



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia**

**CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO
QUÍMICA E ENERGÉTICA DO BIÓGAS PRODUZIDO
EM BIODIGESTOR EXPERIMENTAL**

**Autor: Carlos Felipe Ilha Pereira
Orientador: Wytler Cordeiro dos Santos**

**Gama, DF
2014**



Carlos Felipe Ilha Pereira

**CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA
DO BIÓGAS PRODUZIDO EM BIODIGESTOR EXPERIMENTAL**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Wytler Cordeiro dos Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bento da Silva

**Gama, DF
2014**



CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E ENERGÉTICA DO BIÓGAS PRODUZIDO EM BIODIGESTOR EXPERIMENTAL

Carlos Felipe Ilha Pereira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 16/06/14 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Wytler Cordeiro dos Santos, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Felix Martin Carbajal Gamarra, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr^a. Maria Del Pilar Hidalgo Falla, UnB/ FGA
Membro Convidado

Agradecimentos

Aos orientadores Wytler Cordeiro e Marcelo Bento por aceitarem a orientação deste estudo, conduzirem seu desenvolvimento e pelas sugestões, revelando-se um grande diferencial para a minha formação acadêmica.

Aos professores Félix Gamarra e Maria Del Pilar, por terem aceitado participar da banca examinadora deste TCC.

Aos profissionais da Fazenda Água Limpa da UnB que contribuíram com a execução deste trabalho, como a professora Luci e seu orientando de mestrado Carlos.

À UnB por ter me oferecido a oportunidade de crescer intelectualmente.

A cada professor que contribuiu com o meu aprendizado e aos funcionários da FGA.

A minha mãe e professora de Letras, Elza Ilha que, ofereceu-se para revisar este trabalho.

Ao meu pai, Joelson Pereira, e irmãs, Bruna e Bianca, pela confiança e apoio que me deram desde os meus primeiros anos escolares até hoje.

À Juliana Nunes, pelo carinho, apoio e companheirismo durante vários períodos de minha graduação.

Resumo

O possível esgotamento dos combustíveis fósseis como fonte de energia traz a necessidade de buscar e diversificar fontes renováveis de energia. Nesse âmbito, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para que melhor se possa compreender o sistema biológico dos processos anaeróbios, o tratamento de orgânicos para conversão em biogás e a tecnologia dos reatores, a fim de aperfeiçoar esse processo (SALOMON, 2007). No presente estudo, a biodigestão anaeróbia é uma alternativa renovável de energia. Essa forma de produção de energia é composta por algumas etapas de reações químicas, as quais são importantes serem conhecidas para que o processo tenha boa eficiência. O biodigestor, como equipamento que acondiciona os resíduos que serão decompostos, mesmo quando experimental, deve ser adequado às condições de construção e operação. Para a realização desse estudo, desenvolveu-se um protótipo para monitoramento e obtenção de gás metano, tendo-se como objetivo geral analisar os fundamentos da biodigestão e identificar parâmetros que influenciam na obtenção do gás metano, assim como realizar a análise espectroscópica do biogás. Os objetivos específicos compreenderam construir o biodigestor, realizar testes de funcionamento para a obtenção de biogás e determinar a quantidade de energia do gás produzido. Os dejetos suínos para a biodigestão foram obtidos na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL/UnB). O biodigestor foi carregado na FAL/UnB e monitorado na Faculdade do Gama da Universidade de Brasília (FGA/UnB). Os resultados apontaram a produção de metano, dióxido de carbono, água (vapor) e outros compostos previstos nas equações parciais. Por meio da análise espectroscópica, identificou-se que a variação da concentração de metano, no decorrer do tempo, aumentou até o 12^o dia de funcionamento. Observou-se que a presença de gás oxigênio no início da reação e o formato da câmara de biodigestão interferem na obtenção do gás metano. A temperatura do reator influenciou na grandeza de vazão de metano. A construção do biodigestor experimental requisiu qualidade no acabamento para não ocorrer vazamentos de gás. A quantidade de energia obtida na queima do metano teve a mesma grandeza em relação a que consta nos registros de outros estudos.

Palavras-chave: Biodigestor. Biodigestão Anaeróbia. Metanogênese. Espectroscopia.

Abstract

The possible depletion of fossil fuels as an energy source brings to seek and diversify sources of renewable energy. This scope, multiple searches are being developed so that it can better understand the biological system of anaerobic processes for the treatment of organic conversion to biogas reactors and technology in order to optimize this process (SALOMON, 2007). In this study, the anaerobic digestion is a source renewable alternative energy. This form of energy production is composed of some steps of chemical reactions, which are known to be important that the process has good efficiency. As equipment packaging waste to be decomposed, the biodigester, even when experimental, should be appropriate to the conditions of construction and operation. To the realization of that study has developed a prototype for monitoring and obtaining methane gas. Taking as general objective of this work was to analyze the fundamentals of biodigestion and identify parameters that influence the obtain the methane gas, as well as carry out spectroscopic analysis of biogas. The specific goals understood construct the digester, performing functional tests for obtaining biogas and determining the amount of energy in the gas produced. The manure for digestion were obtained from Fazenda Água Limpa of the University of Brasília (FAL / UnB). The digester was loaded in FAL / UnB and monitored in the Faculdade do Gama of the University of Brasília (FGA / UnB). The results indicated the production of methane, carbon dioxide, water (steam) and other compounds provided for in the partial equations. By means of spectroscopic analysis, it was identified that the variation of the concentration of methane in the course of time, increased to the 12th day of operation. It was observed that the presence of oxygen gas at the beginning of the reaction and the digestion chamber can interfere with obtaining the methane gas. The temperature of the reactor influenced the magnitude of flow rate of methane. The construction of the experimental biodigester requested quality finish for gas leaks do not take place. The amount of energy obtained from burning the methane has the same magnitude relative to what is in records of other studies.

Keywords: Biodigester. Anaerobic Digestion. Methanogenesis. Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Usina de Biogás Könnern na Alemanha.....	14
Figura 2. Principais etapas da biodigestão anaeróbia	18
Figura 3. Graus de liberdade das moléculas: estiramento simétrico (A), estiramento assimétrico (B), deformação angular (C).....	21
Figura 4 Espectrômetro com a célula para gás	22
Figura 5 Vista em Corte do biodigestor indiano construído pela CESP, dimensões em mm	27
Figura 6 Ferramentas utilizadas na construção do biodigestor	28
Figura 7 Vista frontal, superior, lateral e em corte do biodigestor construído, dimensões em mm	29
Figura 8 Biodigestor construído.....	30
Figura 9 Água e Dejetos utilizados	33
Figura 10 Medição da massa dos substratos	33
Figura 11 Medição da massa dos substratos	34
Figura 12 Técnica para medição do volume de biogás no <i>bag</i>	36
Figura 13 Aquecimento da água por meio da combustão do biogás.....	37
Figura 14 Vista isométrica do biodigestor dimensionado pela CESP	54
Figura 15 Vistas Superior e Corte B-B do biodigestor, dimensões em mm	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Espectro obtido para a primeira coleta de biogás.....	40
Gráfico 2	Espectro obtido para a segunda coleta de biogás	41
Gráfico 3	Espectro obtido para a terceira coleta de biogás.....	41
Gráfico 4	Espectro obtido para a quarta coleta de biogás.....	42
Gráfico 5	Espectro obtido para a quinta coleta de biogás	42
Gráfico 6	Espectro obtido para a sexta coleta de biogás	43
Gráfico 7	Espectros das coletas, evidenciada a região de estiramento de alceno....	44
Gráfico 8	Espectros das coletas, evidenciada a região de estiramento de CO ₂	45

LISTA DE TABELAS

1	Cronograma de execução da pesquisa	24
2	Materiais utilizados	26
3	Pressão durante o teste de vazamento	31
4	Diluição em água para cada espécie animal	33
5	Medições de massa da mistura	34
6	Instrumentos de medição utilizados no trabalho	35
7	Dados das coletas de biogás	38
8	Relação entre concentrações de metano nas amostras de biogás.....	46
9	Quantidade de energia transferida para a água.....	47
10	Gastos de materiais na construção e operação do biodigestor	52
11	Equivalência energética	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

IR-Infravermelho.

Símbolos Gregos

$\bar{\nu}$ –Número de ondas

λ – Comprimento de onda

ν –Estiramento

δ – Deformação angular

ρ –Densidade da água

Subscritos

s –Simétrico

as –Assimétrico

atm –Atmosférica

1000- Simboliza, em mm, a distância entre a cota baixa e a mais alta do biodigestor

nível1 –Dimensão entre a cota mais baixa e o nível da água na câmara de digestão

morto –Simbologia para volume morto

T –Total

tubo40 –Faz referência ao tubo 40mm do gasômetro

água –Água

1 –Amostra 1

2 –Amostra 2

Símbolos Latinos

P_0 –Potência do feixe incidindo na amostra

I –Potência do feixe após atravessar o caminho absorvedor

A – Absorbância

a –Absorvidade;

b : Caminho óptico.

c –Concentração da espécie absorvente

n –Número de átomos de uma molécula

P –Pressão

g –Aceleração da Gravidade

H –Altura em relação à cota-base do biodigestor

V –Volume

C_{H_2O} –Calor específico da água

Ce – Carregamento diário de esterco

Cd –Carregamento total diário

nc –Número de cabeças de gado

Ppb– Previsão de produção de biogás por dia

Pgd– Produção de gás em 24 horas

Tr – Tempo de retenção

Vge– Volume de gás produzido pelo esterco

Vu – Volume útil do biodigestor

Vug– Volume útil do gasômetro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 1. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	17
CAPÍTULO 2. ANÁLISE INSTRUMENTAL.....	20
2.1 Espectroscopia no Infravermelho	20
2.2 Cella de gás para análise no IR.....	22
2.3 Lei de Beer-Lambert	22
CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	38
CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
ANEXO 1: Orçamento e gastos - Abril de 2014	52
ANEXO 2: Construção do biodigestor	53
Requisitos para dimensionamento.....	53
Desenho Técnico.....	54
ANEXO 3: Interferentes do funcionamento do biodigestor	57
ANEXO 4: Energia no lixo	61

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa ocorreu no âmbito do estudo de energias renováveis, tendo como objetivo geral analisar os fundamentos da biodigestão e identificar parâmetros que influenciam na obtenção do gás metano e sua caracterização por meio da técnica análise instrumental de espectroscopia. Os objetivos específicos compreenderam construir o biodigestor, realizar testes de funcionamento para a obtenção de biogás e determinar a quantidade de energia do gás produzido.

Esperava-se produzir metano na reação de biodigestão e,consequentemente, encontrar na análise espectral do gás produzido,que identifica grupos funcionais das moléculas, o grupo metil.Além disso, acreditava-se que a elevaçãoda temperatura de reação produzisse efeito positivo na vazão de produção desse gás.

A seleção deste tema de pesquisa se deu a partir do interesse em contribuir com o progresso da utilização de fontes alternativas de energia. Assim, torna-se necessária a construção de um biodigestor para a utilização em diversos experimentos e caracterização energética a serem realizados pela comunidade acadêmica.

Assim como na década de setenta do século passado, quando houve a crise do petróleo, o atual cenário energético se condiciona para uma crise energética, a qual se formou em decorrência da volatilidade do preço do petróleo e alterações climáticas provenientes da matriz energética predominantemente fóssil. Esse contexto favorece a busca por fontes de energia sustentáveis. Além disso, existe o interesse por fontes alternativas e de bom custo e benefício (PIEROBON, 2007).

O aumento da oferta de energia elétrica para países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil – onde as questões sociais, políticas e ambientais interferem nas questões de produção de energia – faz com que a instalação de biodigestores seja uma alternativa razoável frente a essas questões.

A necessidade de aumentar a oferta de energia vem do hábito de consumo, em grande escala, da população que utiliza a energia elétrica em seus equipamentos e compra produtos que demandam energia no processo de fabricação, interferindo direta e indiretamente no sistema.

Algumas grandes cidades do mundo avançaram com a instalação dos biodigestores em épocas de necessidade de novas fontes energéticas. O primeiro biodigestor surgiu para fornecer gás combustível para um hospital na Índia, em 1857. Alguns anos depois, a utilização dessa fonte de energia foi deixada em segundo plano, pois o petróleo e o carvão estavam sendo consideradas fontes infinitas (SOARES, 2010).

Durante a Segunda Guerra Mundial, com a falta de combustível fóssil e a dificuldade em obtê-lo, os biodigestores foram utilizados para uso doméstico. No Brasil, a importância foi observada na crise do petróleo de 1973. Naquela época, foi instalada essa fonte de energia na Granja do Torto em Brasília. No Programa de Mobilização Energética (PME, 1980), o governo estimulava a instalação desses equipamentos no meio rural. Todavia, problemas operacionais ocasionados por falta de informações e conhecimento fizeram com que os produtores rurais abandonassem esse sistema, fazendo com que caíssem em desuso (BGS, 2013).

Usinas de biodigestores instaladas em vários países do mundo suprem demandas consideráveis de energia elétrica. A exemplo, a Usina de Biogás Könnern (Figura 1), na Alemanha, fornece 15 milhões de m³ de biometano à rede de gás do país. Essa quantidade de gás é equivalente à potência de 17MW (INFINITY BIO POWER, 2013).



Figura 1 – Usina de Biogás Könnern na Alemanha. Fonte INFINITY BIO POWER, 2013.

O processo de biodigestão anaeróbia é uma forma de conversão de matéria orgânica que resulta na produção de metano. O físico Alessandro Volta foi o

primeiro a identificar o ar combustível – como era chamado o gás metano – formado com os sedimentos de rios e lagos, que mais tarde daria origem ao conhecimento do processo químico (SILVA, 2009). A matéria orgânica que os biodigestores podem utilizar são os resíduos sólidos. Segundo a NBR - 10.004¹, resíduos sólidos são materiais heterogêneos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também estão incluídos nessa definição, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água de controle à poluição e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água (ABNT, 2004).

A conversão de componentes orgânicos a formas inorgânicas ocorre devido à oxidação biológica feita pelas bactérias. Na oxidação anaeróbia, as bactérias utilizam componentes químicos. Os principais são: nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^-) e dióxido de carbono (CO_2^-). Esses são utilizados como aceptores finais de elétrons e resultam em produtos finais da oxidação da matéria orgânica, tais como o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) e outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular (SILVA, 2009, Apud LEITE *et al*, 2009).

A biodigestão anaeróbia também ocorre nas estações de tratamento de esgoto doméstico. Os microrganismos são confinados em reatores biológicos que otimizam o processo e obtêm a maior eficiência possível, com objetivo de evitar imposições quanto à reutilização ou proteção de corpos receptores. Nesse contexto, a decomposição ocorre de forma mais controlada e mais rápida que a observada em ambientes naturais (SILVA, 2009).

O biodigestor possui como características a redução de custos, a reutilização de resíduos, robustez e longa duração, contudo, esse equipamento foi deixado de lado pelos pequenos consumidores devido aos programas de expansão da distribuição elétrica e ao avanço de outras fontes alternativas mais fáceis de operar.

Para o desenvolvimento dessa temática, optou-se por estruturá-la em quatro capítulos. No capítulo 1, aborda-se o processo de biodigestão anaeróbia que ocorre com hidrólise, acetogênese e metanogênese que, por meio de bactérias metanogênicas, obtém-se, principalmente, metano e dióxido de carbono.

¹ NBR - 10.004 é uma norma brasileira que aborda a classificação de diversos tipos de resíduos sólidos.

O capítulo 2 compreende a análise instrumental de espectroscopia no infravermelho (IR), a construção de cela de gás para análise no IR e a Lei de Lambert-Beer. Os dois primeiros procedimentos permitem identificar as moléculas presentes em um composto químico. Para análise de gás, necessitou-se de uma câmara de gás já concebida em outro estudo. Através da Lei de Lambert-Beer foram relacionadas as razões entre concentrações de metano, das diferentes amostras, obtidas por meio da espectroscopia de infravermelho.

O capítulo 3 aborda os materiais e os métodos de construção, operação e monitoramento do biodigestor para a coleta das amostras de gás e devidos procedimentos para determinar grandezas físicas necessárias para obtenção dos resultados do estudo.

O capítulo 4 corresponde aos resultados finais. Nessa parte, demonstra-se a análise dos fundamentos da biodigestão, a qual confirma os resultados esperados. Foram tabelados os resultados dos dias de operação do biodigestor e desenvolvidos gráficos espectrais de todas as amostras colhidas que constam no capítulo.

Por fim, as considerações finais apresentam reflexões a respeito dos resultados obtidos e sugestões de futuras pesquisas que podem ser realizadas sobre o objeto de pesquisa aqui tratado.

CAPÍTULO 1. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A produção do metano foi descoberta por Volta, em 1776, em sedimentos de lagos e rios. Recebeu denominação inicial de “ar combustível”. Oitenta anos depois, o cientista Reiset detectou a formação do metano em estrumeiras e propôs o estudo para explicar a decomposição anaeróbia. Em 1868, Bechamp concluiu que a produção do gás metano provinha de microrganismos. Também foi identificado que alguns microrganismos produzem hidrogênio, ácido acético e butírico a partir da celulose. Nesse processo, foram identificadas duas fases: ácida e metanogênica. Na primeira fase, acontece redução do dióxido de carbono para formação do metano e, na segunda, o ácido acético produzido pelos microrganismos é descarboxilado para a formação do metano (SALOMON, 2007, Apud EEA, 2005).

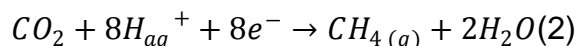
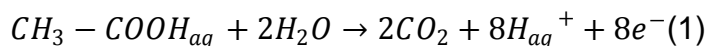
Várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para que melhor se possa compreender o sistema biológico dos processos anaeróbios, o tratamento de orgânicos para conversão em biogás e a tecnologia dos reatores, a fim de aperfeiçoar esse processo (SALOMON, 2007). Isso se revela de grande importância para a sociedade devido à quantidade de resíduos gerados no setor industrial, doméstico e agroindustrial.

A conversão da matéria orgânica pode reduzir o poder poluente dos resíduos. A biodigestão ocorrida com esses resíduos geram uma mistura de metano, dióxido de carbono, nitrogênio, hidrogênio, gás sulfídrico e outros gases. O metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) são os componentes em maior quantidade, com 60% e 39% respectivamente (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Os biodigestores podem ser considerados um ecossistema onde vários microrganismos convertem matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, amônia e gás sulfídrico, além de novas células bacterianas. São várias espécies de bactérias, em simbiose, que realizam o completo processo anaeróbio (SALOMON, 2007).

Os processos anaeróbios são produtores de energia através do biogás utilizado. Esses processos têm baixa produção de biomassa celular, já que utilizam somente 10% dos nutrientes necessários para o processo anaeróbio (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

O processo químico ocorre em diferentes etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Dessas, duas são fundamentais: acidogênica e metanogênica apresentadas respectivamente nas equações (1) e (2).



Na Figura 2 temos as principais etapas da biodigestão anaeróbia (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008) ilustrada através de diagrama para o processo.

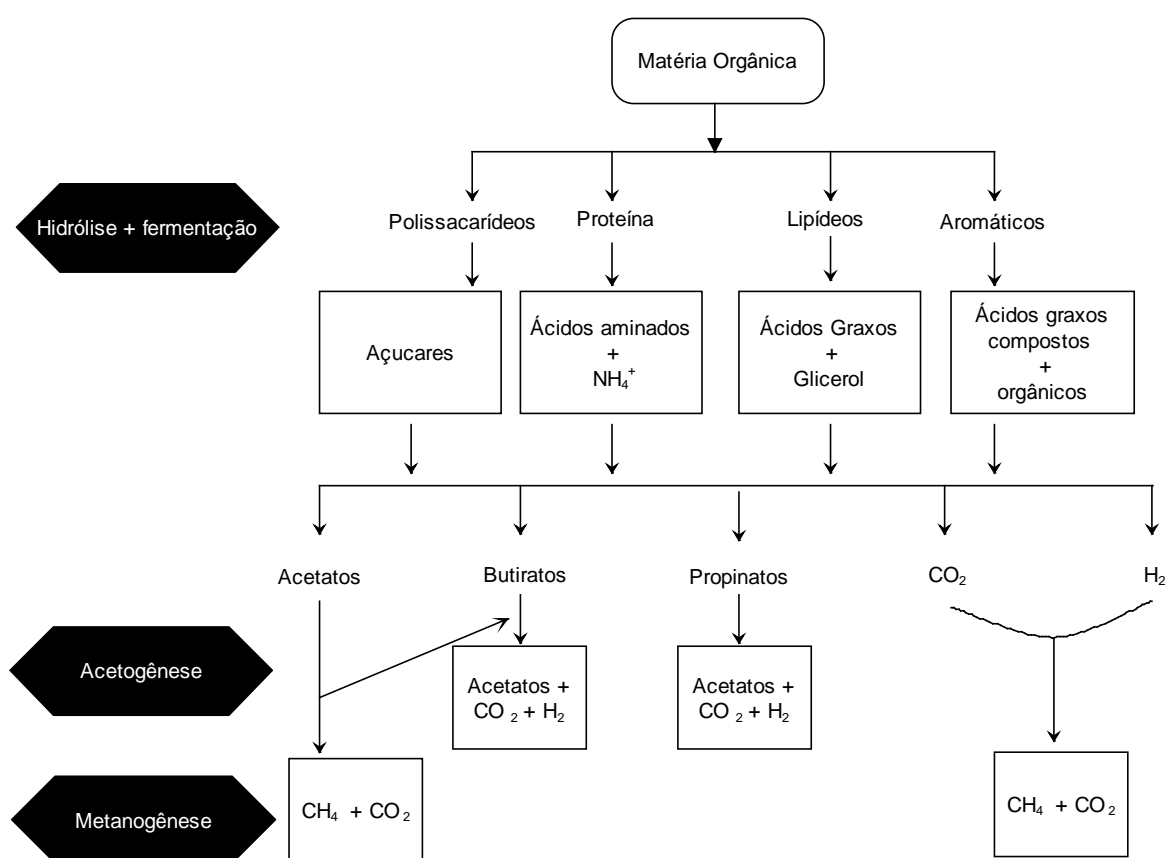


Figura 2 – Principais etapas da biodigestão anaeróbia. Fonte CORTEZ *et al.*, 2008.

A fase ácida pode ser identificada no diagrama da Figura 2 pelo processo “Hidrólise + Fermentação”, os compostos orgânicos complexos (proteínas, carboidratos, gorduras) são hidrolisados, resultando em compostos orgânicos mais simples, isto é, com cadeias menores. Os compostos orgânicos mais simples (açúcares, ácidos graxos compostos e ácidos aminados) são submetidos a uma

oxidação biológica, sendo convertidos em ácidos orgânicos, como o ácido acético (CH_3COOH), propanóico ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-COOH}$) (CORTEZ *et al.*, 2008).

Na fase metanogênica, existem duas formas dos microorganismos produzirem metano: convertendo ácidos, o que forma metano, dióxido de carbono e ácidos orgânicos; ou reduzindo o dióxido de carbono. Essa forma de produzir metano depende dos compostos envolvidos, como pode ser visto na Figura 2. É a fase metanogênica que determina a duração do processo anaeróbio. Essa fase controla a taxa de conversão, logo, é necessário manter condições físico-químicas para favorecê-la, como o pH e temperatura (CORTEZ *et al.*, 2008).

Esse processo químico apresenta vantagens como: menor consumo de energia do que um processo aeróbico tradicional, menor produção de lodo que acarreta em menores custos já que o lodo precisa de disposição final, aceita maiores taxas de matéria orgânica e o metano resultante pode ser utilizado como combustível (CORTEZ *et al.*, 2008).

Com maior tempo de retenção do que os processos aeróbicos, a biodigestão anaeróbia também produz gases que causam corrosão e odores desagradáveis. Pode necessitar de energia extra para elevar a temperatura da mistura a 35°C e obter taxas adequadas de conversão (CORTEZ *et al.*, 2008).

CAPÍTULO 2. ANÁLISE INSTRUMENTAL

2.1 Espectroscopia no Infravermelho

Segundo Barbosa (2007), a espectroscopia no infravermelho é uma técnica analítica utilizada para identificação de compostos orgânicos, inorgânicos e análise de misturas complexas, como gasolina e poluentes atmosféricos. Essa técnica baseia-se na quantidade de energia emitida ou absorvida, por uma molécula, em uma determinada banda de absorção (número de ondas), para determinar qual grupo funcional está presente.

A radiação infravermelha (IR) corresponde à parte do espectro eletromagnético situada entre as regiões de visível e micro-ondas. A faixa que compreende de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} é de grande interesse em processos químicos devido à enorme quantidade de substâncias principalmente os compostos orgânicos, que têm grupos funcionais listados nessa faixa de absorção (SILVERSTAIN *et al.*, 2012).

Uma molécula simples pode ter um espectro complexo devido aos vários modos vibracionais que possui. A radiação no infravermelho converte-se em energia de rotação e de vibração molecular. Na faixa que será analisada, o espectro vibracional aparece como uma série de bandas visto que cada mudança de nível de energia vibracional corresponde a uma série de mudanças de níveis de energia rotacional. A posição da banda em que ocorre picos de absorbância é dependente das massas relativas dos átomos, das forças de ligações e da geometria dos átomos (SILVERSTAIN *et al.*, 2012).

O número de ondas ($\bar{\nu}$) é o inverso de comprimento de onda (λ) e tem unidade de (cm^{-1}). Trata-se da grandeza que caracteriza a faixa de absorção do espectro de IR. Devido à existência de vários graus de liberdade para ocorrer translação, rotação e vibração, a mesma molécula pode absorver em mais de um valor de número de ondas. A rotação e translação de uma molécula no espaço tridimensional e estiramento simétrico (ν_s), estiramento assimétrico (ν_{as}) e deformação angular (δ) são alguns desses graus de liberdade representados na Figura 3 (BARBOSA, 2007).

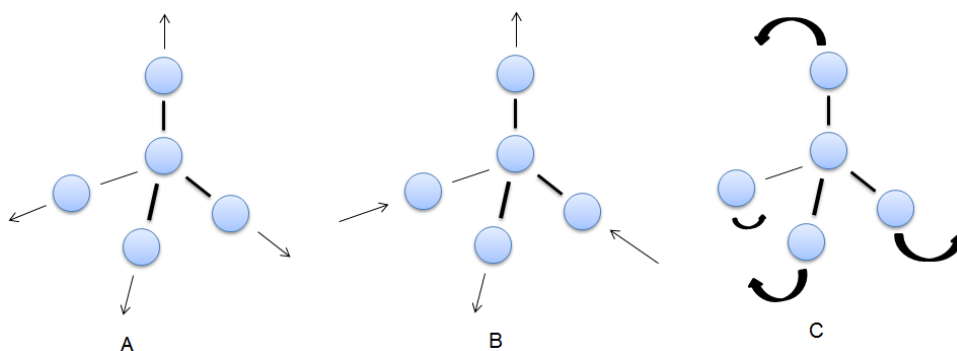


Figura 3 –Graus de liberdade das moléculas: estiramento simétrico (A), estiramento assimétrico (B), deformação angular (C).

Segundo Silverstain (2012), o estiramento é o movimento ao longo do eixo de ligação que modifica a distância interatômica. Se for simétrico às distâncias interatômicas modificam-se no mesmo sentido, se for assimétrico, modificam-se em sentidos diferentes. A deformação angular corresponde a variações ritmadas de ligações que têm um átomo em comum e é determinada por alterações nos ângulos de ligação. São observadas no IR apenas vibrações que levem a alteração rítmica no dipolo da molécula (SILVERSTAIN *et al.*, 2012).

A quantidade de graus de liberdade de uma molécula é igual ao número total de graus de liberdade de seus átomos considerados individualmente, sendo que as moléculas têm graus de liberdade correspondentes aos graus de liberdade do eixo cartesiano necessários para descrever suas posições relativas aos demais átomos da molécula. Para moléculas não lineares a rotação e translação correspondem a seis graus de liberdade. Sabendo que o número total de graus de liberdade é dado por $3n$, em que n é o número de átomos da molécula, o número de graus de liberdade dado por $3n-6$ corresponde a graus de liberdade de vibração para moléculas não lineares (SILVERSTAIN *et al.*, 2012).

O número exato de bandas que autores como Barbosa (2007) e Silverstain (2012) relatam dificilmente será identificado em um espectro de IR obtido nas análises instrumentais, visto que ocorrem: harmônicos, algumas vibrações muito próximas uma das outras ou muito fracas, entre outras interferências que inibem a identificação. Tabelas contendo as faixas de absorções características dos compostos analisados podem ser obtidas nos livros de Barbosa (2007) e Silverstain (2012).

2.2 Cella de gás para análise no IR

Alguns instrumentos de análise espectroscópica não possuem como item de série uma cela de gás para executar a análise. Celas como essa podem custar, no mínimo, US\$300,00. No entanto, é possível confeccionar uma célula com gasto baixo e materiais que podem ser facilmente adquiridos (COLATI *et al.*, 2010).

Uma célula de gás deve conter entradas e saídas de gás e janelas que contenham o gás. A dimensão da célula pode estar relacionada com as dimensões da câmara de análise já existente no instrumento. Pastilhas de Brometo de Potássio (KBr) são utilizadas para as janelas da cela de gás. Para a análise do gás produzido no biodigestor foi utilizado um espectrômetro da marca *Thermo Scientific Nicolet* e juntamente com a cela para análise gasosa confeccionada no laboratório de Células Fotovoltáicas FGA/UnB. Na figura 4 é apresentado o espectrômetro com a cela de gás acoplada (JÚNIOR, L. O., 2013).



Figura 4 –Espectrômetro com a célula para gás.

2.3 Lei de Beer-Lambert

A Lei de Lambert-Beer está relacionada quantitativamente em como a grandeza de atenuação depende da concentração das moléculas que absorvem energia do feixe de luz incidente e da extensão do caminho sobre o qual ocorre absorção (SKOOG *et al.*, 2010).

De acordo com essa lei, a relação entre potência do feixe antes e depois de de passagem pela amostra pode ser utilizada para encontrar o valor de absorvância e, além disso, esse valor é diretamente proporcional à concentração e ao caminho óptico do meio absorvente expressa através da equação (3).

$$\log \frac{P_0}{P} = A = a * b * c(3)$$

onde,

P_0 : Potência do feixe incidindo na amostra;

P: Potência do feixe após atravessar o caminho absorvedor;

A: Absorvância;

a: Absortividade;

b: Caminho óptico;

c: Concentração da espécie absorvente.

Para uma molécula analisada no mesmo instrumento de espectroscopia, que tem amostra de igual tamanho na cela de gás, a absorvância é diretamente proporcional a uma constante multiplicada pela concentração do material absorvedor.

Conforme Skoog (2010), a lei de Beer pode ser empregada de diversas formas: pode-se calcular as absortividades molares das espécies se a concentração for conhecida, assim como podemos utilizar o valor medido de absorvância para obter a concentração se a absortividade e o caminho óptico forem conhecidos. Identificar tipo de solvente, composição da solução e temperatura é importante para a determinação da absortividade e isso faz com que a utilização de dados tabelados para uma análise quantitativa tenha que ser feita com cuidados.

As características da utilização da lei de Beer fazem com que duas formas de análise quantitativa sejam empregadas: determinação da absortividade utilizando-se de uma solução padrão do analito no mesmo solvente à temperatura similar ou, mais frequentemente, utilizar uma série de soluções padrão do analito para construir uma curva analítica, ou curva de trabalho, de Absorvância *versus* concentração da espécie absorvente ($A \times c$) para se obter uma equação linear por regressão. Também pode ser demandado que a composição global da solução padrão do analito seja reproduzida de forma que se torne a mais próxima possível daquela

amostra ou pode-se recorrer ao método da adição de padrão para a mesma finalidade no processo de análise (SKOOG *et al.*, 2010).

O emprego dessa teoria no trabalho a fim de obter o resultado quantitativo da concentração de metano no biogás não pôde ser feita com a determinação da absorvidade, devido ao não acesso de uma solução padrão no mesmo solvente e da dificuldade ao acesso da solução padrão do analito para construir a curva de trabalho. Essas condicionantes fizeram com que ocorresse o desenvolvimento de correlação quantitativa entre as concentrações das amostras obtidas ao longo do tempo.

A correlação entre concentrações das amostras ao longo do tempo foi calculada considerando-se que a absorvidade das amostras fossem iguais para todos procedimentos analíticos, assim, como o caminho óptico que as amostras foram submetidas são iguais, identifica-se que a correlação é linear. Na equação (4) encontra-se um exemplo.

$$A_1 = a * b * c_1$$

$$A_2 = a * b * c_2$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{c_2}{c_1} \quad (4)$$

onde,

A_1 : Absorbância da amostra 1;

A_2 : Absorbância da amostra 2;

a: Absortividade;

b: Caminho óptico;

c_1 : Concentração da espécie absorvente 1;

c_2 : Concentração da espécie absorvente 2.

Os resultados dessa relação foram explícitos por meio de tabela que lista os valores máximos de absorbância para determinado número de ondas das amostras de gás, os quais são correlacionados, com diferença percentual da concentração de cada amostra em relação à concentração da primeira amostra.

CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em seis partes, a partir de cronograma previamente elaborado: delimitação do tema de pesquisa, revisão de literatura, elaborações do projeto de pesquisa (TCC-1), coleta de dados, análise dos dados coletados e redação dos resultados finais. A tabela abaixo apresenta o cronograma de execução da pesquisa.

Tabela1: Cronograma de execução da pesquisa

Data	Atividade
31/03/2014 a 11/04/2014	1. Construção do protótipo e teste de vazamento
11/04/2014 a 18/04/2014	2. Carregamento do Biodigestor
18/04/2014 a 05/05/2014	3. Monitoramento e coleta das amostras de gás;
05/05/2014 a 20/05/2014	4. Caracterização das amostras de gás
20/05/2014 a 26/05/2014	5. Análise dos resultados

Atividade 1: Construção do protótipo e teste de vazamento

Na construção do biodigestor foram levadas em conta a disponibilidade de materiais necessários, condições operacionais e disponibilidade de matéria orgânica que seria utilizada para abastecimento do biodigestor.

Todos os materiais utilizados na construção da câmara de biodigestão não poderiam permitir que gás e massa fossem perdidos através das paredes já que isso se mostraria uma variável de difícil controle no sistema.

Para a câmara de biodigestão foi utilizado um recipiente de 20 litros comercialmente utilizado na distribuição de água potável e, para a coleta e armazenamento do gás, foram utilizados *Bags*. O sistema foi construído em consonância com o modelo de SOUZA *et al.* (2005). Além disso, premissas de construção utilizadas por GARCIA *et al.* (1982) foram seguidas. Na Tabela 2 estão os

materiais utilizados para construir o biodigestor. O custo financeiro dos materiais utilizados são apresentados no ANEXO 1.

Tabela 2 –Materiais utilizados.

Quantidade	Item	Aplicação
1 (Peça)	Recipiente de água de 20L	Câmara de Biodigestão
0,5 m	Tubo flexível 6 mm	Conecta tubulação de gás ao Bag
0,5 m	Mangueira flexível 5/16"	Tubulação para transporte do gás até o Bag. Conecta-se ao terminal espiga
0,5 m	Tubo flexível 8 mm (diâmetro interno: 6 mm)	Conexão da tubulação de gás ao Bag
1 (Peça)	Terminal espiga com rosca macho 9/16" (mangueira 5/16")	Conexão câmara de biodigestão e mangueira
1 (Peça)	Conexão pneumática emenda rápida tipo T para tubo 6 mm	Conexão de dois bags a saída de gás
1 (Peça)	Conexão espiga tipo T para tubo 5/16"	Possibilita a utilização do dreno
1 (Peça)	Regulador de fluxo para mangueira Pu 8 mm	Regular fluxo de saída do gás
1 m	TuboPVC de esgoto 40 mm	Entrada de carga da câmara de biodigestão
30 cm	Tubo PVC soldável 25 mm	Saída de fertilizante (Caixa de saída)
3 (Peças)	Joelho soldável PVC 25 mm	Saída de fertilizante (Caixa de saída)
1 Peça	Niple branco rosca 25 mm	Saída de fertilizante (Caixa de saída)
50 g	Cola de silicone transparente	Vedação entre algumas conexões

Devido a este trabalho abranger prioritariamente a produção de energia, a qual foi obtida por meio da combustão do metano, não foram construídas caixas de entrada e de saída no biodigestor. Na entrada do equipamento foi instalado um tubo de entrada (tuboPVC de esgoto com 40 mm de diâmetro) e, na caixa de saída, foi instalado um tubo de saída (tubo PVC com 25 mm de diâmetro). O transporte de gás ocorreu através das conexões espiga, regulador de fluxo e mangueiras conectadas a

Bags (Restek), de volume máximo de 1060 ml (determinado experimentalmente) e volume nominal de um litro. O posicionamento dos tubos e mangueiras mantém paralelismo de funcionamento com o modelo Indiano.

Para identificar as condicionantes técnicas para o funcionamento adequado do biodigestor lançou-se mão de um projeto já existente para que se pudesse visualizar esses aspectos no equipamento comercial. No ANEXO 2 está descrito o projeto, conforme foi feito seu dimensionamento e construção. Para tanto, foram realizados testes experimentais que culminaram no desenvolvimento desse trabalho e verificação teórica.

No modelo Indiano, construído pela Companhia Energética de São Paulo (CESP) e reproduzido em planta por meio da utilização do *Software* CATIA V5R19 (Figura 5), identificou-se paralelismo nos princípios físicos envolvidos. Nesse modelo, o volume útil, que não se modifica durante sua operação, supera o nível do tubo de saída. O tubo de entrada, por sua vez, posiciona-se submerso em água e há um selo d'água para a tampa-gasômetro (GARCIA & PELLEGRINI, 1982).

A produção de água nas reações da etapa metanogênica, conforme a Eq (2) justifica a instalação de um duto para coletar água (dreno) no tubo de saída. O dreno é composto por uma mangueira da tubulação de gás submersa em água em um ponto baixo da tubulação. O dreno não pode ser retirado da água em nenhum momento, já que ocorreria a perda instantânea de biogás e entrada de oxigênio no sistema, o que poderia interferir diretamente nos resultados do estudo.

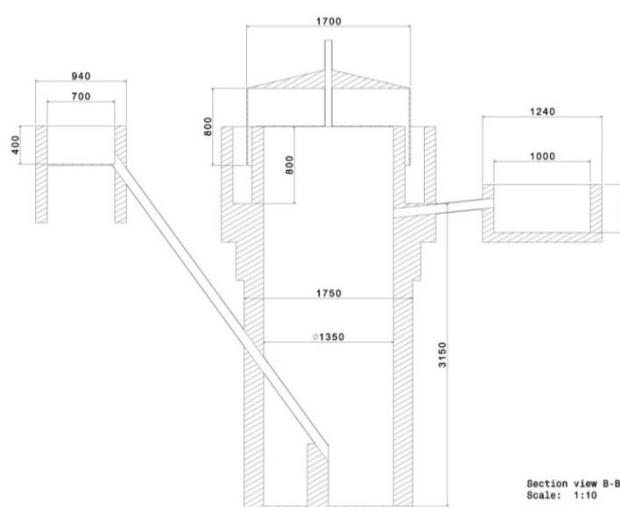


Figura 5 – Vista em Corte do biodigestor indiano construído pela CESP, dimensões em mm.

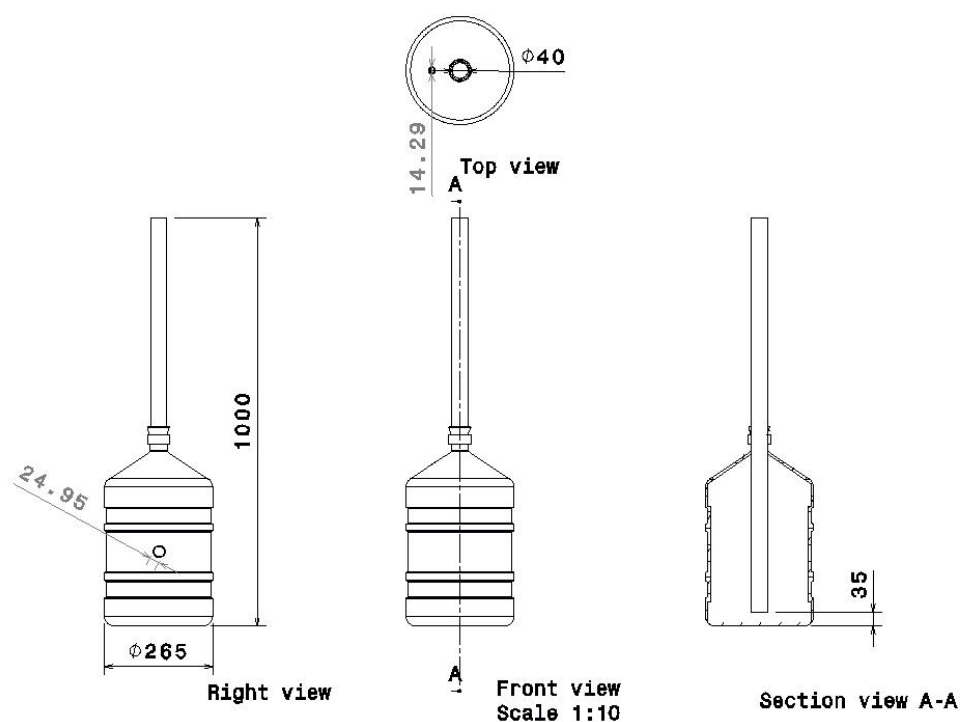


Figura 7 – Vista frontal, superior, lateral e em Corte do biodigestor construído, dimensões em mm.

A usinagem dos tubos necessitou a utilização de arco-serra. Para as perfurações necessitou-se de furadeira: a perfuração de diâmetro de 24,95 mm foi feita com ponta montada esmerile a perfuração de diâmetro de 14,29 mm foi feita com broca.

Encontrou-se um recipiente cujo furo superior proporcionasse ao tubo de PVC de 40 mm ajuste com interferência², mesmo assim, efetuou-se a vedação com a cola de silicone. A Figura 8 apresenta o biodigestor construído.

² Isso ocorre quando o eixo se encaixa no furo com certo esforço.



Figura 8 – Biodigestor construído.

O *Plug* de PVC na saída do reator foi utilizado apenas para o momento de transporte do equipamento, a fim de que não ocorresse perda do substrato. Foi instalado um dreno na tubulação de saída de gás para remoção da água resultante da reação de biodigestão. No decorrer do processo, a condensação da água não poderia formar substância líquida no *bag*.

Assim, o dreno foi submergido em água para evitar perda de gás. Vale lembrar que a pressão máxima a que o gás é submetido é dada pela pressão da coluna d'água que a mangueira do dreno está submetida. Eventuais vazamentos de gás podem ocorrer por este local se a pressão para armazenamento e/ou utilização for maior que a pressão a qual a mangueira do dreno está exposta, eventuais vazamentos podem ocorrer por este local.

Realizou-se um teste para identificação e vedação de possíveis vazamentos. Com o cano de saída devidamente tampado, a câmara de biodigestão foi completada com água até o nível de 302 mm em relação ao nível inferior da câmara de biodigestão – a esse nível ocorre o volume de 16,6 Litros. Através do tubo de 8 mm foi bombeado gás atmosférico até que a pressão levantasse a água através do cano de entrada do biodigestor, até o limite máximo (1000 mm) em relação ao nível inferior da câmara de biodigestão. Após a pressurização do sistema, a válvula de gás foi completamente fechada. A tubulação de gás também foi submergida em água para identificar possíveis vazamentos. Para isso, durante o teste, o dreno foi isolado.

A pressão total (somada a pressão atmosférica) a qual o sistema ficou submetido durante o teste de vazamento encontra-se na Eq (5):

$$P_{sistema} = P_{atm} + \rho * g * (H_{1000} - H_{nível1})$$

$$P_{sistema} = 101325 + 1000 * 9,81 * (1,000 - 0,288) = 108309,72 \text{ Pa} (5)$$

onde:

P_{atm} : Pressão atmosférica

ρ : Densidade da água

g : Aceleração da gravidade

H_{1000} : Dimensão em metros em relação à cota base do biodigestor e nível da água;

$H_{nível1}$: Dimensão em metros entre a cota base do biodigestor e o nível da água após ser pressurizada.

Para identificar os vazamentos foi utilizado sabão em todas as conexões do sistema. Nos locais em que ocorreram vazamento aplicou-se uma camada uniforme de cola de silicone.

Após essa vedação, realizou-se o teste novamente e monitorou-se a pressão exercida pelo sistema. Esse teste prosseguiu por dois dias e os novos níveis de pressão que foram registrados estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 –Pressão durante o teste de vazamento

Tempo [Horas]	Pressão coluna [Pa]	Pressão [Pa]
20	6105,00	107430,00
40	5674,00	106999,00

Após a medição, verificaram-se novamente as conexões e não foram constatados outros vazamentos. Concluído o teste, confirmou-se que não ocorreram vazamentos nas conexões do biodigestor. A variação de pressão pode indicar algumas características que possivelmente ocorrem: deformação das paredes do reator, deformação das mangueiras ou existência de micro porosidade nas paredes³.

Atividade 2: Carregamento do biodigestor

Obteve-se autorização dos responsáveis pela FAL/UnB, para poder fazer a coletados dejetos, com o propósito de carregar o biodigestor.

A acessibilidade ao local e maior facilidade da coleta determinou que fossem utilizados dejetos de matrizes fêmeas. A alimentação das matrizes compôs-se de ração que contém: farelo de trigo, farelo de soja e milho triturados e minerais. Os suínos eram alimentados diariamente, nos turnos matutino e vespertino. No local também havia uma pequena disponibilidade de pastagem (vegetal). A composição dos dejetos relaciona-se com essa alimentação.

Os baldes para coleta e mistura dos compostos foram previamente marcados com os níveis necessários para realizar a mistura. No ato da mistura, utilizou-se balança digital para medir e adequar as massas a serem misturadas. Os valores de diluição em água, para cada espécie animal, estão listados na tabela 4.

³ O que seria perceptível apenas aos gases, visto que não ocorreu perda da mistura líquida.

Tabela 4 – Diluição em água para cada espécie animal. Fonte: OLIVER *et al.*, 2008.

Espécie animal	Relação esterco : água em kg
Caprino/ovino	1:4 a 5
Vaca, Vaca Leiteira, Bezerro e Boi	1:1
Suíno	1:1,3

O carregamento ocorreu com a coleta dos resíduos e diluição em água. A Figura 9 demonstra os dejetos e a água utilizados. A água utilizada na diluição foi obtida da rede de distribuição local.



Figura 9 – Água e Dejetos utilizados.

A Figura 10 mostra o procedimento de pesagem da água e do esterco para carregamento do biodigestor.



Figura 10 – Medição da massa dos substratos.

A mistura da água e dos dejetos foi feita com utilização de uma haste apropriada até que a homogeneização completa ocorresse. Na Figura 11 esse detalhe é evidenciado.



Figura 11 –Composto homogeneizado.

A construção do biodigestor e limite de carregamento prevê um volume morto, que está acima do nível da mistura de carregamento até o limite imposto pelas paredes do gaseificador. Para encontrar o volume morto, que inicialmente continha ar atmosférico, é necessário conhecer a quantidade de mistura que foi submetida ao biodigestor (Tabela 5).

Tabela 5: Medições de massa da mistura

Batelada	Massa de água	Massa de esterco
1	4,0 ± 0.1 kg	3,1 ± 0.1 kg
2	4,0 ± 0.1 kg	3,1 ± 0.1 kg
3	1,0 ± 0.1 kg	1,3 ± 0.1 kg

O volume morto é encontrado conforme lista a Eq (6):

$$V_{morte} = V_T - V_c - V_{tubo\ 40} \quad (6)$$

$$V_{morte} = 20 - 16,5 - 0,19 = 3.3115\ L$$

onde:

V_{morte} : Volume morto que armazena gás (Gasômetro);

V_T : Volume total do recipiente utilizado;

V_c : Volume da câmara de biodigestão com substrato;

V_{tubo40} : Volume ocupado pelo Tubo 40mm no Gasômetro.

Atividade 3: Monitoramento e coleta das amostras de gás

A característica experimental do biodigestor e a necessidade de envolver baixo custo justifica a utilização de aquecimento por meio de aquecimento solar. O biodigestor foi exposto à luz e ao aquecimento solar no pátio da FGA/UnB. A temperatura da mistura foi monitorada com a utilização de um pirômetro e de um termômetro e controlada – regulando a exposição solar do biodigestor – para ter variações e não exceder à faixa de operação adequada para as bactérias. Os instrumentos utilizados para efetuar as medições estão listados na Tabela 6.

Tabela 6: Instrumentos de medição utilizados no trabalho

Instrumento	Marca/Modelo	Fundo de escala	Precisão
Pirômetro	Kimo Kiray 200	850 °C	0,1 °C
Termômetro	Gehaka Thermo Hygro	50 °C	1 °C
Balança	Digital Game Scale	150 kg	0,1 kg
Balança	Portatil DG 5000	5 kg	1 g
Régua	Maped	30 cm	0,5 mm
Proveta	Astral científica	500 ml	2,5 ml
Espectrômetro	Thermo Scientific Nicole	9000 cm ⁻¹	<0,4 cm ⁻¹

	iS10 FT-IR		
--	------------	--	--

O gás foi coletado com *bags* da marca Restek, o qual tem boa estabilidade para compostos de baixo peso molecular, entre eles, metano e dióxido de carbono de volume 1 litro (RESTEK, 2014).

Atividade 4: Caracterização das amostras de gás

Para determinar o volume de gás utilizou-se a proveta e um béquer conforme apresentado na Figura 12. Para tal, a proveta foi completada com água e submergida em béquer contendo água e o gás transferido à proveta através de um duto. O Bag, utilizado para a coleta do gás, foi pressionado para expulsar todo o gás contido nele.



Figura 12 – Técnica para medição do volume de biogás no *bag*.

Quanto à análise espectroscópica, utilizou-se o espectrômetro e uma câmara de gás (cela) construída para este equipamento acoplada ao espectroscópio (Figura 4). Inseriu-se ar seco à câmara de gás através de bomba de vácuo conectada a um filtro que continha sílica e à cela de gás, realizando-se o Collet Background por meio do Software OMNIC Spectra. Após isso, conectou-se o bag à tubulação que já estava conectada à câmara pressionando-o até que um volume considerável de biogás circulasse pelo sistema, expelindo o ar seco da câmara. Na sequência realizou-se o Collet Sample, seguido pela obtenção dos valores de absorbância que foram exportados no formato “csv”.

Com a utilização do software Origin 7.0, foram produzidos gráficos de absorvância versus número de onda. Os gráficos identificam todos os picos encontrados no espectro e são subsídios para determinar a relação de concentrações de metano nas amostras.

Por fim, para confirmar o poder combustível do gás e mensurar a energia produzida foram utilizados 1060ml de biogás para realizar a queima⁴ e aquecer um béquer de massa 40g contendo, no primeiro teste, 26g de água e no segundo 35g de água ($C_{H_2O} = 4,18J/g^{\circ}C$). O bico utilizado, formado pela mangueira e um terminal metálico, foi conectado a mangueira de gás do *bag*. Com a utilização do pirômetro e do termômetro identificou-se as temperaturas inicial e final da água.

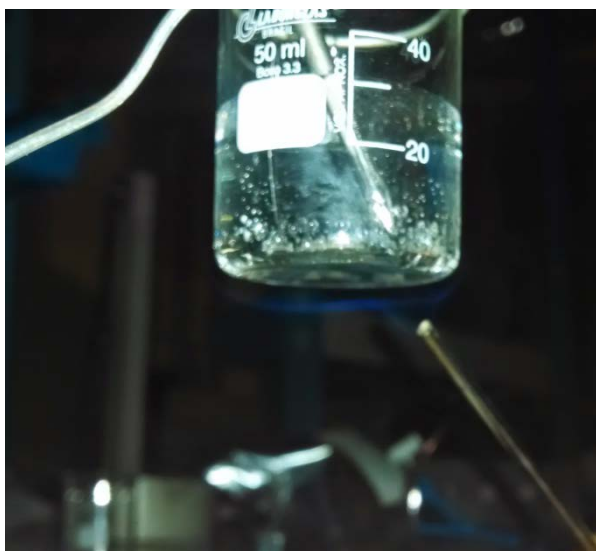


Figura 13 – Aquecimento da água por meio da combustão do biogás.

Atividade 5: Análise dos resultados

Por meio da utilização de tabelas de absorções características de grupos funcionais obtidas de SILVERSTAIN *et al.* (2012) e BARBOSA (2007), foram identificadas as substâncias presentes no gás coletado do biodigestor e a partir daí gerados gráficos através da utilização da Lei de Lambert-Beer. Questões identificadas no monitoramento permitiram interpretar aspectos funcionais que podem interferir na construção de biodigestores. Dados de produção de energia do equipamento foram comparados com trabalhos da literatura.

⁴Combustão do Metano: $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ $\Delta H_{298} = - 802 \text{ kJ/mol}$

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

A primeira produção de biogás ocorreu entre os dias 17/04 e 25/04, sendo produzidos 2120 ml. A temperatura aferida no local do experimento (Fazenda Água Limpa) foi de 28 °C.

O monitoramento da temperatura no biodigestor foi realizado através da utilização do pirômetro e iniciou-se após a segunda coleta. Para as duas primeiras coletas, o biodigestor permaneceu a temperatura ambiente, acondicionado à sombra e a temperatura informada nestas coletas referem-se à temperatura ambiente. A produção de gás ocorreu conforme os dados listados na Tabela 7.

Tabela 7 –Dados das coletas de biogás.

Coleta	Data de produção do gás	Volume (ml)	Temperatura (°C)	Tempo de produção	Vazão (ml/h)
1 ^a	17/04 a 25/04	2120	28	-	-
2 ^a	25/04 a 29/04	<1060	20	-	-
3 ^a	29/04	1060	29,2	5h40	187,3
4 ^a	09/05	2120	27	7h40	276,5
5 ^a	14/05	910	34,4	2h00	455
6 ^a	21/05	1060	30,1	4h00	265

Conforme afirma Garcia e Pellegrini (1981), a temperatura de reação é um dos interferentes nas condições de fermentação e desempenho do biodigestor. Essa diferença foi detectada no experimento. Para temperatura em torno de 20°C, a velocidade de produção do gás foi muito baixa, devido a isso, a amostra coletada foi utilizada para identificação espectroscópica.

Na 5ª coleta o volume produzido foi medido com a técnica da proveta, o que incorreu uma perda de biogás contido no bag. Para a análise de espectro IR, obteve-se um volume pequeno de gás.

Como as amostras foram coletadas em datas diferentes, variação da vazão em função da temperatura também é interferida pela condicionante de tempo de reação já ocorrida (data de produção do biogás), no entanto, foi identificada uma variação brusca de quantidade de gás produzido. Conforme consta em Souza *et al.* (2005), para a temperatura de 35°C, a produção acumulada de biogás em um biodigestor é aproximadamente cinco vezes maior do que a produção acumulada de biogás em um biodigestor a 25°C (SOUZA *et al.*, 2005). Essa correlação entre quantidade de gás obtido foi similar na pesquisa desenvolvida.

Comparando-se os dados de vazão, observa-se também que a produção de biogás é menor nos primeiros dias. Nas medições posteriores ao 12º dia de produção, o vazão de produção manteve-se patamar mais alto para quaisquer das temperaturas.

Devido às características funcionais utilizadas para o experimento desta pesquisa, já especificadas no capítulo 4 –Materiais e Métodos–, não foi coletado todo o gás produzido para poder encontrar a produção específica de gás por quantidade de esterco, porém, por meio da vazão medida e do tempo de retenção hidráulica, citado por Oliver *et al.* (2008) foi possível mensurar tal volume de gás produzido através da equação (7).

$$V_{biogás} = Q_{biogás} * T_{Retenção hidráulica} \quad (7)$$

$$V_{biogás} = 0,295 * 35 * 24 = 247,8 L$$

Visto que o tempo de retenção hidráulica é um valor que pode variar já que, contendo substrato no reator a reação ocorre, considera-se que o resultado obtido dentro da ordem de grandeza esperada é suficiente.

A massa de esterco foi de 7,4 Kg e que a vazão utilizada foi a média das vazões. Sob essa perspectiva, O volume de biogás esperado nesse experimento, segundo os valores obtidos de Oliver *et al.* (2008), é de 555 L (0,075 m³/kg).

Considerando-se a ordem de grandeza do resultado o experimento está consonante com a literatura. Segundo SOUZA *et al.* (2005), o experimento teve a

formação do biogás durante a fase de partida de 71 dias, o carregamento do biodigestor produzido foi feito apenas na fase de partida, assim como nesta pesquisa apresentada.

A análise espectroscópica do gás foi feita de modo a determinar os principais compostos presentes nas amostras, tendo como premissa inicial que o processo químico estabelecido foi a biodigestão anaeróbia. Os gráficos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam os espectros dos gases obtidos nas coletas a partir do processo de biodigestão. É possível observar nos espectros das amostras analisadas uma convergência bastante similar dos picos encontrados.

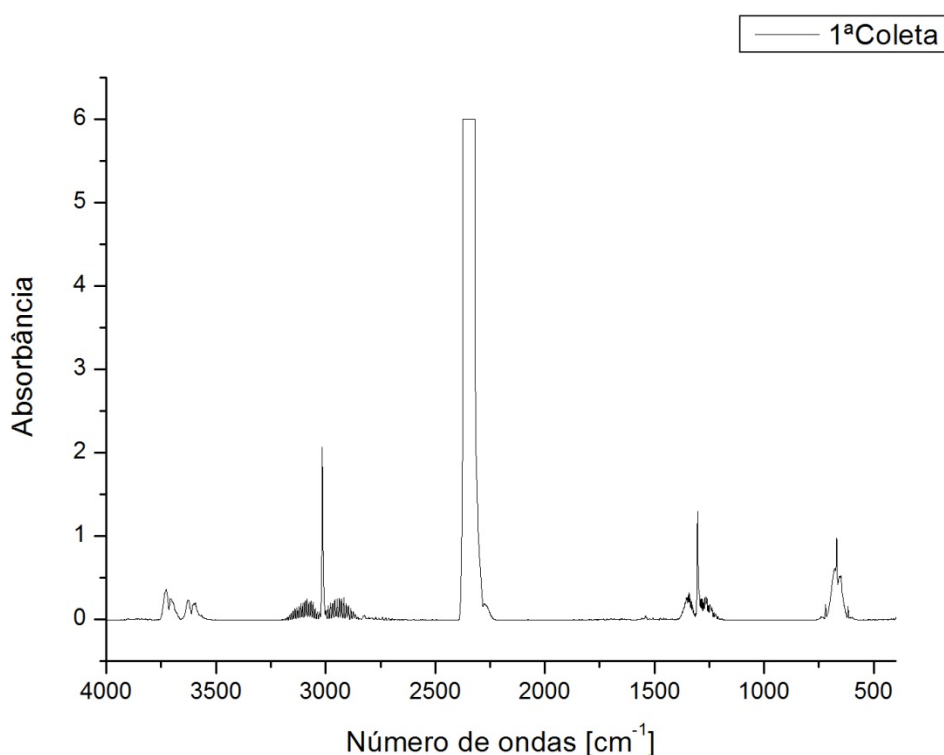


Gráfico 1 – Espectro obtido para a primeira coleta de biogás.

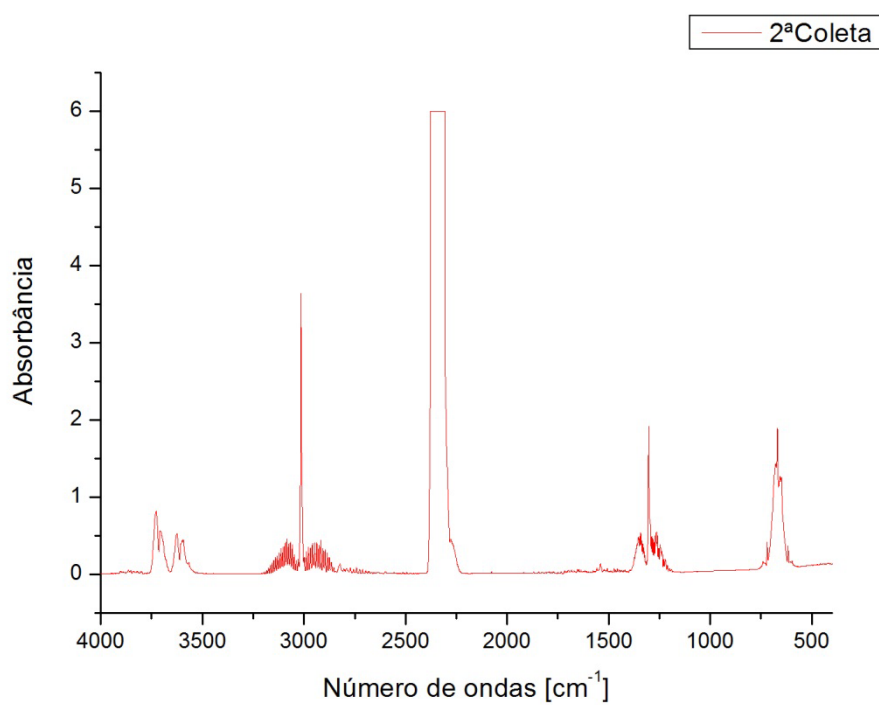


Gráfico 2 – Espectro obtido para a segunda coleta de biogás.

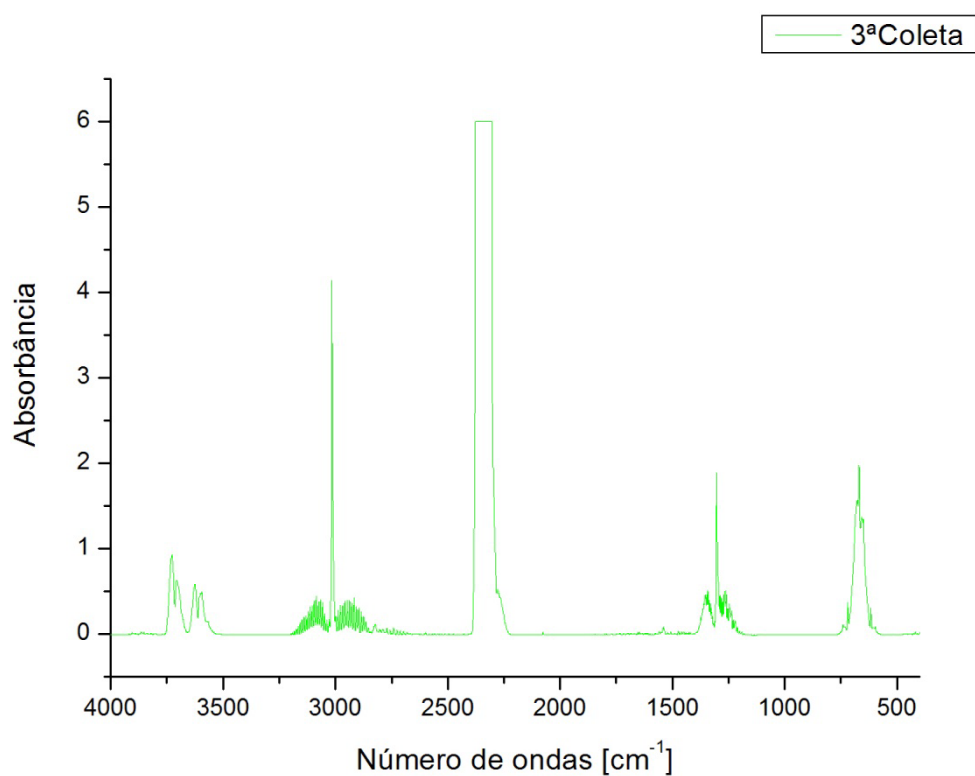


Gráfico 3 – Espectro obtido para a terceira coleta de biogás.

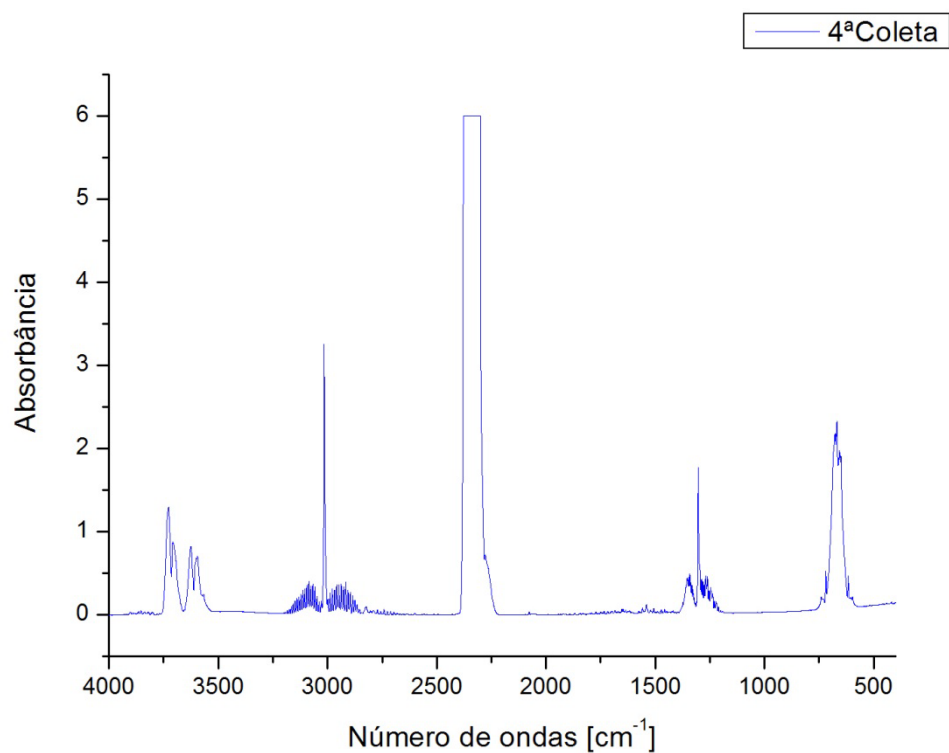


Gráfico 4 – Espectro obtido para a quarta coleta de biogás.

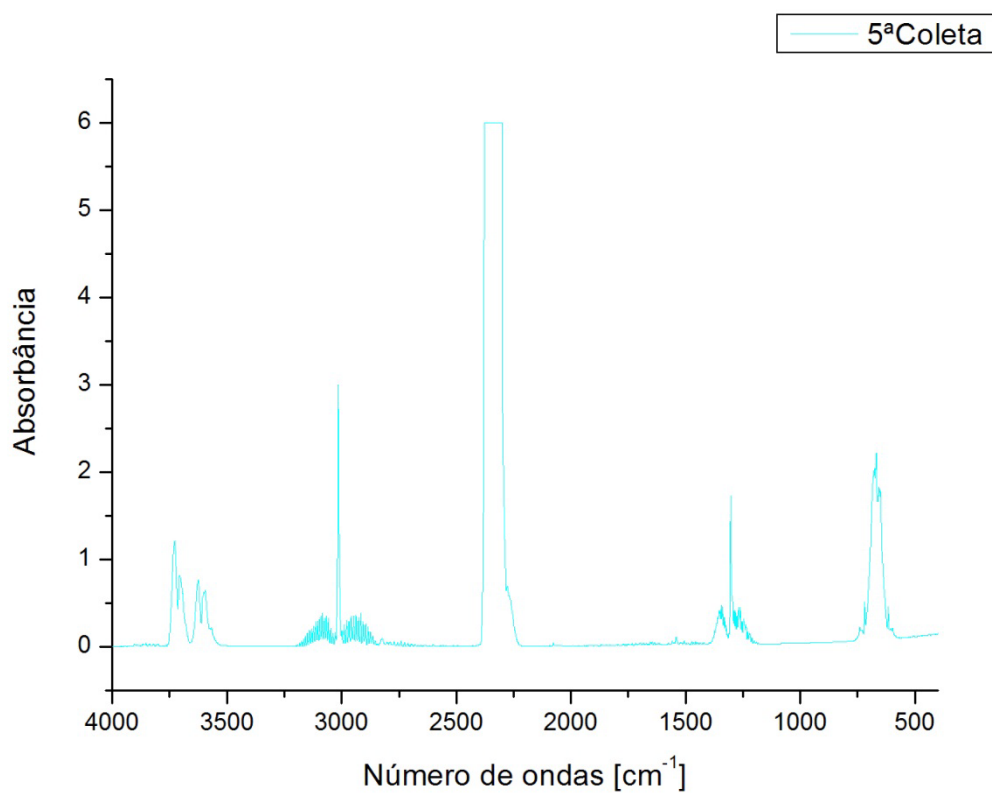


Gráfico 5 – Espectro obtido para a quinta coleta de biogás.

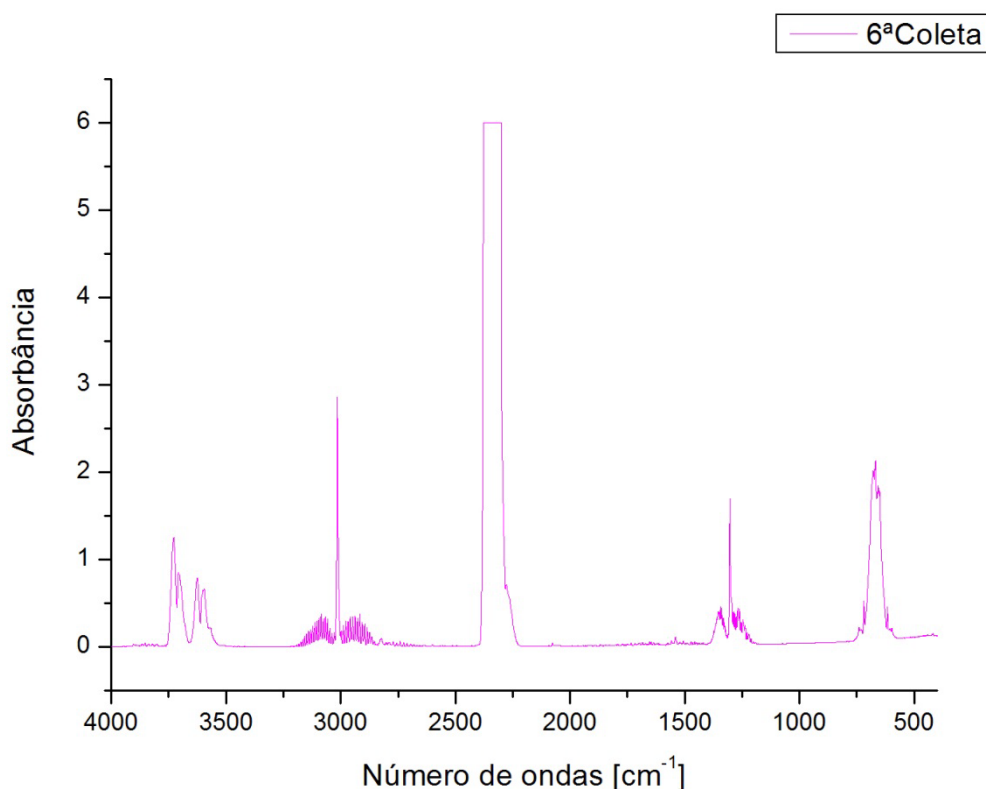


Gráfico 6 – Espectro obtido para a sexta coleta de biogás.

A compreensão do espectro de IR ocorre por meio da análise de um espectro comparado com dados já identificados e tabelados por autores. A utilização de tabelas de BARBOSA (2007) e SILVERSTAIN *et al.* (2012), algumas das absorções esperadas não foram observadas. Porém, foram consideradas aceitáveis as pequenas diferenças, já que pode haver erros devido à combinação de instrumentos envolvidos no processo de análise.

A identificação da banda de absorção na região entre 3800 e 3500 cm^{-1} aponta para a possibilidade de existência de grupo hidroxila (OH) ou grupo amina (NH). Como a banda na região de 3800 a 3500 cm^{-1} não é grande o suficiente para caracterizar um grupo de ácido carboxílico (R-COOH), assume-se que a molécula seja água (H_2O) visto que ocorre formação de água na redução do CO_2 em CH_4 (Eq (2)) e que não é esperada quantidade significativa de um álcool nos produtos desta reação. Há paralelismo entre a quantidade estabelecida de água vapor e metano, o que demonstra que a reação obedeceu a seus coeficientes estequiométricos.

A existência de banda fina na região de 3000 cm^{-1} aponta o estiramento de ligação carbono hidrogênio. A presença de alcanoé confirmada com a existência de absorção na região próxima a 1400 cm^{-1} (deformação angular do alcano). Esse pico da região de 3015 cm^{-1} identifica, muito provavelmente, que, devido às condições químicas estabelecidas ocorre absorção de estiramento simétrico e assimétrico para a molécula do metano.

A diferença entre o número de ondas esperado ($2885\text{ a }2975\text{ cm}^{-1}$) e o número de ondas encontrado para na região de absorção de alcano, constitui-se um fenômeno normal para a técnica utilizada. A diferença entre o número de ondas de absorção nessa região foi de 1,3%, o que é um valor pequeno e aceitável nas condições experimentais que ocorreram os testes, as quais se compuseram de utilização de cela de gás de pequeno caminho óptico e construída na universidade, utilização de uma mistura de gases e realização da análise espectroscópica com *Background* do ar seco. No Gráfico 7 mostram-se os espectros sobrepostos para região de absorção de alcano.

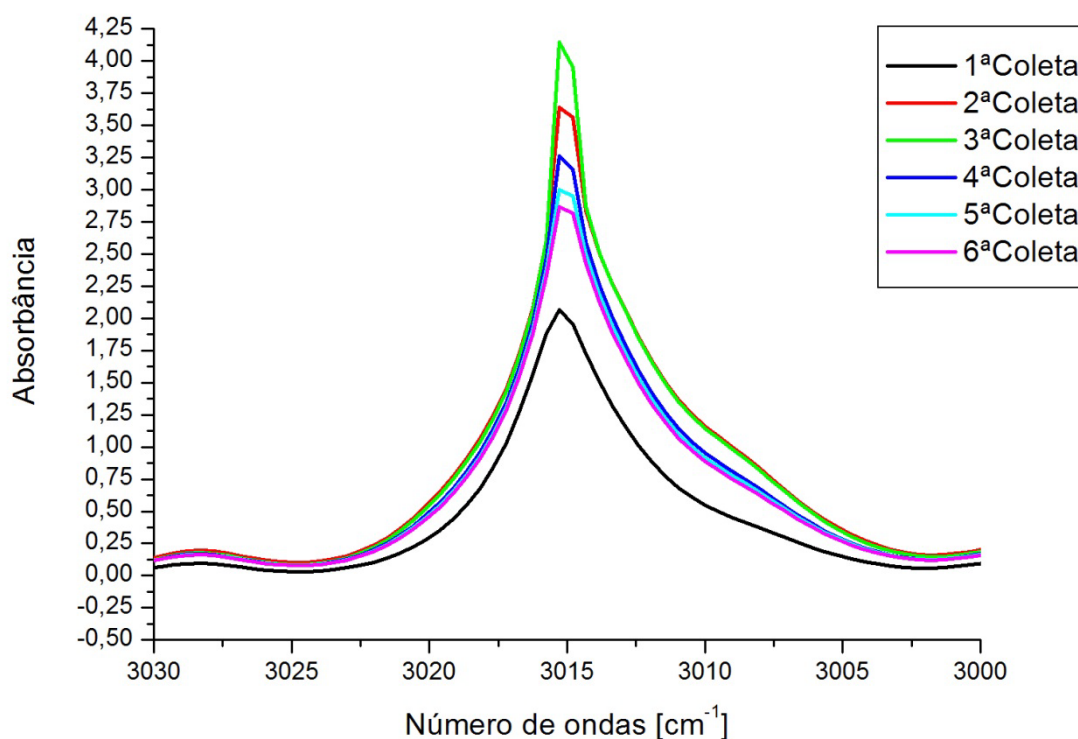


Gráfico 7 – Espectros das coletas, evidenciada a região de estiramento de alcano.

Segundo COLATI *et al.*, (2010), dióxido de carbono aponta para absorções intensas em 2350 e 669 cm^{-1} . No Gráfico 8 são evidenciadas grandes absorções na região de 2300 cm^{-1} . O dióxido de carbono é esperado como subproduto da reação incompleta do processo de biodigestão anaeróbica. O CO_2 na fase metanogênica deveria reduzir-se para produzir metano, porém a análise aponta grande quantidade de dióxido de carbono na amostra.

Algumas possibilidades para não ter ocorrido a redução do dióxido em maior quantidade podem ser intoxicação à população de bactérias, presença de inibidores da fermentação e pH da reação fora da faixa ótima de operação, sendo que não foi realizado monitoramento específico desses interferentes de desempenho. Além disso, temos que a utilização de água que contém alguma quantidade de cloro também atua como um interferente na reação e também pode ter proporcionado uma menor velocidade da reação. Durante a realização do processo a temperatura foi variada e demais variáveis foram mantidas fixas. No ANEXO 3 é comentado alguns interferentes do processo de biodigestão.

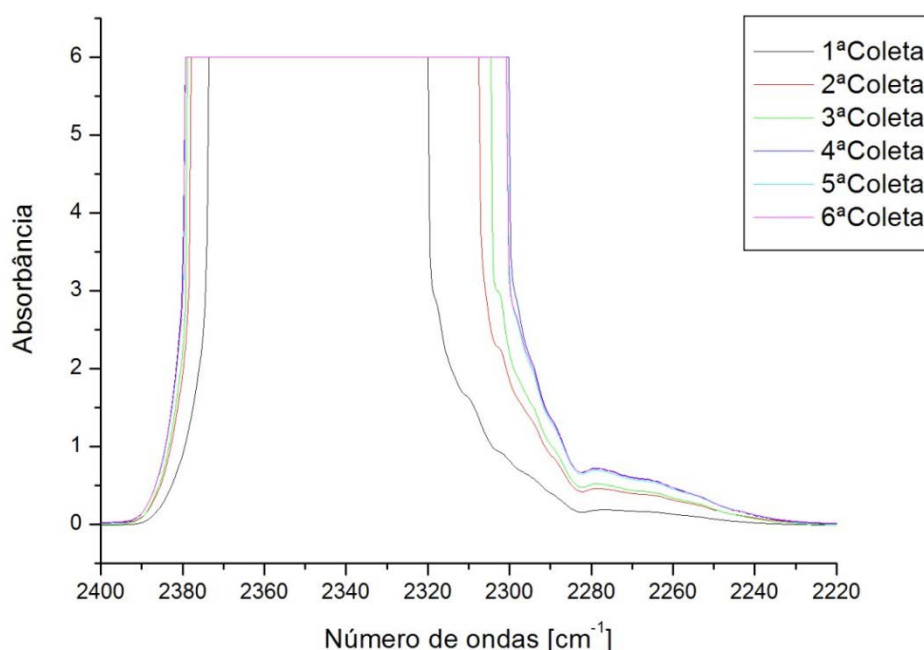


Gráfico 8 – Espectros das coletas, evidenciada a região de estiramento de CO_2 .

Por meio da aplicação da Lei de Beer–Lambert no Gráfico 7 encontrou-se a relação entre as concentrações. A Tabela 8 apresenta os valores de absorbância para $\bar{\nu}=3015 \text{ cm}^{-1}$ para cada amostra de gás e expõe a diferença percentual entre concentração da amostra 1 e as outras amostras.

Tabela 8 –Relação entre concentrações de metano nas amostras de biogás

Amostra		1	2	3	4	5	6
	Absorbância	2,06787	3,63712	4,14299	3,25872	2,99973	2,86498
1	2,06787		+75,9%	+100,35%	+57,59%	+45,06%	+38,55%

É possível observar na Tabela 8 aumento percentual da concentração de metano até o 12^o dia de produção de gás em todas as amostras. Como a reação foi iniciada em condição de atmosfera com oxigênio e não a atmosfera inerte⁵ (trata-se de processo anaeróbico, portanto o oxigênio é desfavorável) podemos observar uma menor concentração de gás metano no início do processo, visto que o volume morto é suficientemente grande para diluir o metano que seria inicialmente produzido; maior demora para iniciar a reação, sendo que a condição anaeróbia favorece as bactérias criofílicas, mesofílicas e termofílicas.

Durante o período em que o sistema não alcançou a condição anaeróbica, o processo químico pode ter consumido mais energia e ter biodigerido uma menor taxa de matéria orgânica. Esse fator é corroborado em CORTEZ *et al.* (2008) na consideração de vantagens entre a biodigestão aeróbia e anaeróbia.

A partir do monitoramento do biodigestor, identificou-se que há dificuldade das moléculas de gás da solução em vencer a barreira imposta pela coluna de matéria orgânica. No entanto, para uma maior profundidade, melhor é a isolação da solução de esterco e água em relação ao oxigênio atmosférico existente quando o sistema não é evacuado. Agregando-se a essas interferências para a obtenção do metano, a criação de uma câmara de biodigestão com menor profundidade e um mesmo volume proporcionará maior facilidade da obtenção do gás localizado no nível inferior do biodigestor. Nesse caso, o rigor com a ausência de oxigênio deve ser maior.

Ao realizar a combustão do biogás, verificou-se aquecimento do conjunto béquer e água a diferentes temperaturas, devido às diferentes massas de água contidas no béquer. Obteve-se um valor de quantidade de calor e energia específica

⁵Condição em que a ar ambiente contém muito pouco oxigênio e bastante gás inerte, como o nitrogênio.

que foi transferida da chama do gás ao conjunto. Na Tabela 9 estão listadas as quantidades de energia transferida para a água nos experimentos de combustão realizados.

Tabela 9 – Quantidade de energia transferida para a água.

Experimento	Massa de água (g)	Variação de Temperatura (°C)	Quantidade de calor transferida (KJ)	Quantidade de energia por litro (KJ/m³)
1	26	69	7,50	7075
2	35	72,3	8,78	8283

No ANEXO 4 há considerações teóricas acerca dessa energia do biogás e potencial energético do uso do gás. Considerando o processo de transferência de calor de uma chama para o béquer com água e que há perdas que não puderam ser estimadas, o resultado obtido aproximou-se do esperado. Sabendo que a eficiência de um fogão à gás liquefeito de petróleo, segundo o INMETRO, é por volta de 60%, e que o processo desenvolvido deve apresentar uma eficiência semelhante, a energia contida no biogás seria de 13805 KJ/m³ no experimento com o maior resultado (INMETRO, 2014).

O valor encontrado pode também ser considerado para estimar a quantidade de metano no biogás. Considerando-se que toda energia do biogás provém do metano, e que, de acordo com os dados do ANEXO 2, biogás contendo 55% de metano há 23023 KJ de energia, no biogás do experimento que resultou maior quantidade de calor há aproximadamente 33% de metano. A diferença no resultado decorre das condicionantes experimentais e mensuração aproximada das perdas envolvidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou analisar os fundamentos da biodigestão e identificar parâmetros que influenciam na produção e obtenção do gás metano, assim como realizar análise espectroscópica do biogás. Além disso, construir o biodigestor, realizar testes de funcionamento e determinar a quantidade de energia do gás produzido, por meio da combustão, integra o trabalho de modo garantir solidez ao assunto.

Identificou-se que a temperatura é um importante regulador da velocidade de reação e obtenção do metano, assim como o formato da câmara de biodigestão que modifica a pressão necessária para o gás vencer a coluna de matéria orgânica até que alcance o gasômetro.

No biogás estava contida uma quantidade representativa de dióxido de carbono, metano, além de vapor d'água. A quantidade de metano no biogás aumentou do início até antes do meio do ciclo de coletas estabelecido. Mesmo que contivessem contaminantes e quantidade representativa de outros gases na mistura, estabeleceu-se uma chama com o gás; a energia foi mensurada. A combustão do gás complementa a análise espectral e confirma que a molécula, que foi o mais importante objeto deste estudo e que absorveu energia quando o número de ondas esteve na região dos 3000 cm^{-1} , é o integrante majoritário do biogás, o metano.

Assim, esta pesquisa visou propor a análise de construção e operação de um biodigestor e análise do gás além da energia produzida por meio do biodigestor. Acredita-se que esse biodigestor experimental contribuirá para diversificar a obtenção de energia, na identificação de condicionantes que possam interferir na biodigestão anaeróbia, na produção de metano e no desenvolvimento de novas pesquisas na universidade.

A contribuição deste trabalho à comunidade de pesquisas torna-se relevante através dos requisitos construtivos e operacionais que, se forem aprimorados, podem estabelecer a reutilização desta fonte renovável de energia que, no Brasil, caiu em desuso e, atualmente, com a necessidade de diversificação, surgem novos estudos para avaliar melhores aproveitamentos. Pode ser desenvolvido um novo modelo, que, associado a técnicas automatizadas de produção, armazenamento do gás e utilização de co-geração, proporcionem aumento da eficiência na obtenção de biogás, representando uma das grandes oportunidades de desenvolvimento no setor de energia do país.

Por todos esses aspectos apresentados, pode-se inferir que os objetivos da pesquisa foram atingidos, visto que se obteve energia a partir da realização experimental de biodigestão anaeróbia, e que foram identificados os principais compostos resultantes desse processo, o que proporcionou a identificação de qualidade da ocorrência da biodigestão realizada. Por fim, Também foram obtidas características dos aspectos construtivos que devem ser levadas em conta para o desenvolvimento de biodigestores experimentais.

Cabe ressaltar que serão valiosos estudos futuros sobre biodigestão anaeróbia e desenvolvimento de modelos a fim de proporcionar a utilização da enorme energia disponível que está sendo desperdiçada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS–ABNT. **NBR 10004: Informação e Documentação -Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARBOSA, L. C. A. **Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos**. Editora UFV, Viçosa, p. 13-60, 2007.
- BGS EQUIPAMENTOS**, Disponível em <www.bgsequipamentos.com.br>. Acesso em 12/05/2014.
- CORTEZ, L. A. B; LORA, E.E.S; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp, Campinas, 2008.
- CETESB, **Biogás pesquisas e projetos no Brasil**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 2006.
- CORTEZ, L. A. B; LORA, E.E.S; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp, Campinas, 2008.
- COLATI, K. A. P; SANTOS, R. B.; JÚNIOR, C. G. Z.; FILHO, E. N. CUNHA, A. G.; **Construção de uma célula de gás de baixo custo para análise no infravermelho**. Nota técnica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.
- GARCIA, F.P., PELLEGRINI, M.C. **Dimensionamento, construção e operação de digestores rurais de pequeno porte**. Série Pesquisa e Desenvolvimento. Companhia Energética de São Paulo, São Paulo, 1982.
- GARCIA, F.P., PELLEGRINI, M.C. **Fundamentos do processo da digestão anaeróbia**. Série Pesquisa e Desenvolvimento. Companhia Energética de São Paulo, São Paulo, 1981.
- INFINITY BIO POWER**. Disponível em: <<http://infinitybiopower.com/biogas/projects1/projects/>>. Acesso em 02/05/2013.
- INMETRO**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/fogoes.pdf>>. Acesso em 08/06/2014.
- JÚNIOR, L. O. **Efeitos da injeção de água na performance e característica de emissões em motores diesel de injeção direta utilizando misturas diesel-biodiesel**. Projeto de graduação, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**, Texto baseado no trabalho de conclusão de curso,

submetido em agosto de 2006 ao corpo docente do MBE/Coppe. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 59-100, 2008.

LEITE, V.D; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD. S.; Silva, S. A. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos**. Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 13:190, 2009.

OLIVER, A.P. M.; NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Winrock International Brasil, Salvador, 2008.

PELLEGRINI, M.C. **Construção, Operação e Testes em Biodigestor no Parque Zoológico de São Paulo**. Companhia Energética de São Paulo, São Paulo, 1990.

PIEROBON, L R. P. **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SALOMON, K.R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da biodigestão da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SOARES, R. C.; SILVA, S. R. C. M. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFT: Cuiabá, 2010.

SOUZA, C. F.; JÚNIOR, J. L.; FERREIRA, W. P. M. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato – considerações sobre a partida**. Revista Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.2, p.530-539, 2005

RESTEK, Disponível em: <<http://http://www.restek.com/catalog/view/11097>>. Acesso em 10/05/2014.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH S. R. **Fundamentos de química analítica**. Cengage Learning, tradução da 8ª ed., p.678-693, 2010

ANEXO 1: Orçamentoe gastos - Abril de 2014

Tabela 10: Gastos de materiais na construção e operação do biodigestor

Produto	Quantidade	Preço Total (R\$)
Recipiente de água de 20L	1	20,00
Tubo flexível 6 mm	1 metro	2,50
Mangueira flexível 5/16"	1 metro	2,00
Tubo flexível 8 mm (diâmetro interno: 6 mm)	1 metro	3,00
Terminal espiga com rosca macho 9/16" (mangueira 5/16")	2 peças	6,00
Conexão pneumática emenda rápida tipo T para tubo 6 mm	1 peça	1,80
Conexão espiga tipo T para tubo 5/16"	1 peça	2,30
Regulador de fluxo para mangueira Pu 8 mm	1 peça	15,00
Tubo PVC de esgoto 40 mm	1 metro	3,50
Tudo PVC soldável 25 mm	1 metro	3,00
Joelho soldável PVC 25 mm	4 peças	10,00
Niple branco rosca 25 mm	1 peça	3,50
Cola de silicone transparente	1 Tubo	12,00
<i>Bag Restek 1L</i>	6	500,00

ANEXO 2: Construção do biodigestor

Requisitos para dimensionamento

Ao se modelar o biodigestor para resíduo agropecuário esterco bovino fresco semi-estabulado, tem-se os valores estipulados pela CESP como parâmetros básicos:

- Produção diária do esterco por cabeça: 10 kg;
- Diluição na proporção de 1:1 esterco água;
- Tempo de retenção (T_r): 30 dias;
- Expectativa de produção de gás por kg de esterco (V_{ge}): $0,040 \text{ m}^3 / \text{Kg}$.

Considerando 7 a 8 cabeças:

- Carregamento diário de esterco (C_e): 75kg de Esterco;
- Carregamento diário de água (diluição): 75kg de Água;
- Carregamento total diário (C_d): 150L/dia (aproximadamente);

O volume útil do biodigestor é dado pela relação do carregamento diário e tempo de retenção, conforme escrito na Eq. (8).

$$V_u = C_d * T_r \quad (8)$$

$$V_u = 30 * 150 = 4,5 \text{ m}^3$$

A previsão de produção de biogás por dia (P_{pb}) é mostrada na Eq. (9), depende das características do resíduo que será utilizado no biodigestor.

$$P_{pb} = V_{ge} * C_e \quad (9)$$

$$P_{pb} = 75 * 0,040 = 3 \text{ m}^3/\text{dia}$$

As dimensões do biodigestor deverão corresponder às equações exemplificadas. Se o biodigestor for utilizado com o mesmo insumo, mesmo número de cabeça de gado (nc), teremos o volume útil do digestor (Vud) na Eq (10):

$$\begin{aligned} Vud &= Cd * Tr \\ Vud &= 2 * (10 * nc) * Tr \\ Vud &= 2 * (10 * nc) * 30 = 0,60 \text{ nc m}^3 (10) \end{aligned}$$

O Volume útil do gasômetro (Vug) deverá ser relacionado com a produção de gás a cada 24 horas (Pgd), como demonstrado nas Eq. (11) e Eq. (12).

$$Pgd = 0,37 * nc \text{ m}^3 \quad (11)$$

$$Vug = 0,5 * Pdg \quad (12)$$

$$Vug = 0,185 * nc \text{ m}^3 (12)$$

Desenho Técnico

De acordo com a CESP para o modelo Indiano temos os itens básicos da planta da Figura 14 que compõem o equipamento. O desenho técnico foi feito utilizando o *Software* CATIA V5R19.

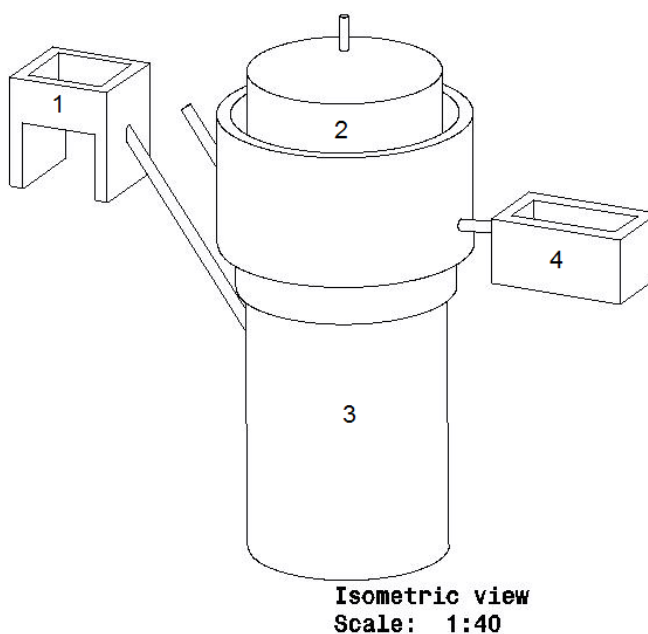


Figura 14 – Vista isométrica do biodigestor dimensionado pela CESP.

Conforme enumerado na Figura (14), os componentes do biodigestor são:

1. Caixa de entrada.
2. Tampa-Gasômetro.
3. Câmara de digestão.
4. Caixa de saída.

A descrição dos componentes e as dimensões necessárias para o correto funcionamento serão feitas individualmente.

A Caixa de entrada deve ter dimensões para suportar o carregamento total diário “Cd” e deve estar em um nível mais elevado que o nível do material da câmara de digestão. Esse modelo é construído em alvenaria.

A Tampa-Gasômetro deve ter um volume útil mínimo equivalente à metade da previsão de produção de biogás por dia (Ppb). Há um eixo guia composto por tubos concêntricos que mantém a tampa gasômetro oscilando no mesmo eixo e reduz a possibilidade de quebra na estrutura da caixa de biodigestão. Os eixos também são o canal de saída de biogás. O Tubo que pode ser visto acima da tampa-gasômetro serve para coleta do biogás. Há barras de suporte do eixo guia, engastadas na parede da caixa de biodigestão. Isso pode ser identificado na Figura (15).

A tampa gasômetro pode ser posta logo em cima da massa em digestão. Foi construído um selo d’água para evitar perda do gás e odores para o meio ambiente.

Na câmara de digestão ocorre a degradação do material orgânico. Para proporcionar isolamento térmico, essa câmara fica dentro do solo e é dimensionada de acordo com o tempo de retenção do material adicionado no biodigestor. Para a construção em alvenaria, a recomendação é que as camadas sejam contínuas, a fim de evitar formação de trincas.

A caixa de saída servirá como delimitadora do nível de material dentro da câmara de digestão. No modelo reproduzido deve ser construída em alvenaria, no sentido oposto à caixa de entrada, e com dimensões equivalentes a esta caixa.

Na Figura 15 temos a vista superior e corte B-B e as cotas relativas ao modelo implantado pela CESP.

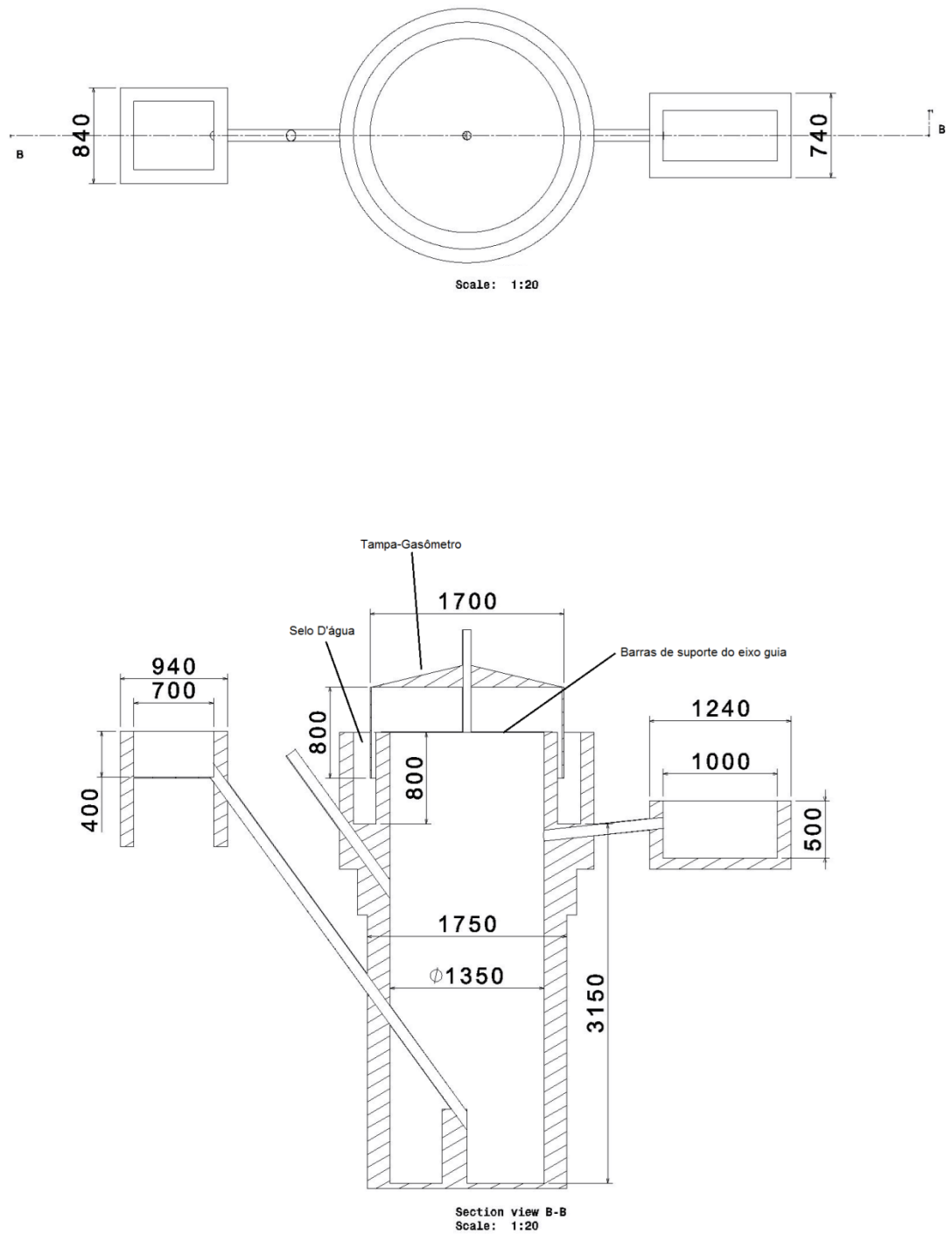


Figura 15 – Vistas Superior e Corte B-B do biodigestor, dimensões em mm.

ANEXO 3: Interferentes do funcionamento do biodigestor

Condições operacionais

As condições de desempenho dos biodigestores dependem de muitas variáveis, como há uma reação química realizada por bactérias, devemos levar em conta certas particularidades inerentes a sua função e que se enquadrem, preferencialmente, as disponibilidades e recursos existentes no local de funcionamento. Conforme afirma GARCIA e PELLEGRINI (1981), a matéria prima, que é o subsídio de operação do biodigestor, deve ser tratada quanto as variáveis descritas abaixo.

- Granulometria dos sólidos: o tamanho da partícula a ser admitida na alimentação, quando se trata de resíduos sólidos, deve ser o mais homogêneo possível. Uma técnica de peneiramento do material é necessária.
- Diluição em água: é necessário fazer a diluição adequada com cada insumo.
- Carregamento da caixa de entrada: deverá ocorrer com vários tipos de resíduos, a fim de complementar o volume total de operação. Resíduos urbanos, fezes humanas, dejetos animais, resíduos agrícolas.
- Pré- fermentação: os resíduos agrícolas necessitam da pré-fermentação aeróbia antes da diluição em água para alimentação do biodigestor.
- Presença de inibidores da fermentação: resíduos químicos e industriais, detergentes, metais, enxofre, amônia, alta concentração de ácidos voláteis e sódio e potássio, hidrocarbonetos clorados (clorofórmio), desinfetantes e pesticidas.
- Presença de material inerte: material inerte misturado ao material de alimentação é outra variável que pode afetar o desempenho. A decantação poderá ser feita, diluindo-se a mistura em água, misturando bem e aguardando ocorrer a decantação, antes de alimentar o digestor. O precipitado são os Inertes que devem ser separados do substrato diluído. Esse procedimento evita a obstrução do cano de entrada da alimentação.
- Algumas relações de proporção entre elementos químicos devem ser verificadas e corrigidas por um químico, são elas:

- a) Relação carbono nitrogênio: essa relação é muito importante para a produção de gás. Deve-se manter uma relação de 30:1, carbono: nitrogênio. Para manter essa relação, pode ser aumentada a quantidade de substratos que contenham elevados teores de carbono que contenham nitrogênio. Com condições favoráveis ao crescimento bacteriano, há um bom desenvolvimento da reação. Caso essa relação seja alta, o processo será limitado pelo nitrogênio disponível. Se for muito baixa, a elevada quantidade de amônia pode causar intoxicação à população de bactérias.
- b) Relação carbono: fósforo: deve permanecer em 150:1.

Depois de adequadas as condições dos resíduos, GARCIA e PELLEGRINI (1981) apontam outras variáveis que também afetam o desempenho e devem estar controladas por um profissional da química, durante o processo químico, são as condições de fermentação, as quais devem seguir a normalização citada nos próximos itens.

- pH da reação: a produção do metano no biodigestor ocorre com o pH dentro da faixa de 7 e 8, que é considerada ótima para esse processo. Na prática, esse valor de pH deverá ficar entre 6,5 e 7,2. em se mantendo os outros parâmetros controlados.
- Adição de corretivos: se a acidez aumentar e passar do limite satisfatório, uma maneira de sanar esse problema é interromper a alimentação do digestor por alguns dias. Outra maneira seria adicionar materiais neutros na alimentação do biodigestor, um reagente possível é o hidróxido de cálcio, bicarbonato de sódio ou soda caustica.
- Temperatura de reação: a digestão anaeróbia pode ocorrer entre 5 a 55°C, para cada faixa de temperatura bactérias metanogênicas específicas estão ativas. As criofílicas abaixo de 10⁰, mesofílicas entre 10-45⁰, termofílicas entre 45-55⁰. No digestor da Companhia Energética de São Paulo (CESP) implantados em Corumbataí, temperatura entre 27-36⁰ se mostraram satisfatória ao desenvolvimento do processo.
- Tempo de retenção: o tempo de retenção ou de permanência do material no digestor, varia de substrato a substrato, devendo, para tanto, ser bem observado para o correto funcionamento do digestor dimensionado e

aproveitamento total do material, tanto para a produção de gás como para a de fertilizante. O tempo de retenção pode ser calculado dividindo a capacidade total do digestor pela quantidade de material orgânico adicionado por dia.

- Agitação do meio: quando a digestão é feita pelas termofílicas, é conveniente utilizar um sistema de agitação lenta e intermitente para uniformizar a temperatura de operação e favorecer o desprendimento de gás da matéria em digestão.
- No caso de um biodigestor de maior porte, devem ser instaladas divisórias internas para aumentar o percurso do material em digestão e conseqüentemente mais movimentação do meio, são convenientes para homogeneizar a mistura.
- Pressão de produção do gás: a pressão de produção do gás em geral é baixa podendo ser utilizado em fogões após pequeno aumento dos furos do bico ejetor.

Para utilização do gás em motores estacionários, deve-se aumentar a pressão a um mínimo de 15 m.c.a., o que se pode obter através da colocação de peso na tampa do gasômetro do biodigestor indiano, com aumento da carga diária ou não consumo de gás durante um período de produção para um biodigestor chinês.

É necessário observar algumas características dos resíduos e do modo de operação, as quais também influenciam no desempenho do digestor. As variáveis a seguir deverão ser medidas e controladas (GARCIA; PELLEGRINI, 1981):

- Quantidade de resíduo: dependente do tipo de resíduo com o qual será alimentado.
- Densidade: a relação entre massa e volume da amostra úmida ou seca
- Quanto à diluição do resíduo: a proporção de Resíduo: Água deve seguir uma razão que depende do insumo utilizado. Quanto o resíduo é esterco bovino, a diluição em água deve seguir a razão 1:1, caso seja esterco de galinha a razão adequada é 1:3 ou 1:5, para origem do esterco de frango de corte ou de galinha poedeira.

- É indispensável misturar bem os componentes envolvidos, observar a mistura e, caso tenha muito material inerte realizar a mistura e esperar que ocorra precipitação, o material sobrenadante deve ser separado (penas de galinha, serragem).
- Quanto à frequência de carregamento: o carregamento deve ser diário de preferência sempre no mesmo período e horário.
- Saída do efluente: a saída do material digerido não pode ser forçada, deve ser espontânea;
- Drenagem do efluente: em se tratando de locais com utilização do fertilizante próximo ao local do biodigestor, pode ser coletado o fertilizante na caixa de saída e transportado até o local de consumo e aplicado mecanicamente.

Caso o local seja distante, é necessário construir um depósito com sistema de água drenada do efluente para aplicar na irrigação. O material precisa ficar aproximadamente 3 dias neste leito, dependendo da temperatura do local, para ser transportado.

Com a observância e teste dessas variáveis na utilização do biodigestor proposto, teremos um bom desempenho no processo de produção tanto de biogás e fertilizante nesse biodigestor, conforme previsto pela Companhia Energética de São Paulo.

ANEXO 4: Energia no lixo

No Brasil e no mundo quantidades significativas de energia estão no lixo. A geração anual de metano em depósitos de resíduos sólidos no Brasil é de 677.000.000 Kg, o que representa o volume de 945 milhões de m³ considerada a densidade de 0,716 kg/m³ (CETESB, 2006. Apud IPCC 2006).

Devem-se ter iniciativas para reaproveitar essa energia. Considerando-se a composição do biogás afirmado por Pellegrini (1990) de 55% metano, o volume total de biogás é de 1718 milhões de m³ gerados anualmente.

Considerando o percentual de recuperação de 90%, estariam disponíveis 1546 milhões m³ de biogás para geração de energia elétrica. (LANDIM; AZEVEDO, 2006).

No caso do poder calorífico do biogás bruto de 5500 kcal, temos a energia de 9,878 TWh, de acordo com a conversão energética feita com Tabela (11), (PELLEGRINI, 1990).

Tabela 11: Equivalência energética.FONTE PELLEGRINI, 1990.

Equivalência energética para 1m ³ de Biogás		
	Gás Bruto 5500 kcal	Purificado 8400 kcal
Gasolina	0,575 l	0,878 L
Óleo Diesel	0,518 l	0,791 L
Álcool Carburante	0,894 l	1,365 L
Querosene	0,536 l	0,819 L
Gás de cozinha	0,438 kg	0,669 Kg
Carvão de Madeira	1,240 kg	1,984 Kg
Energia em kJ	23023 kJ	35162 KJ
Energia em kWh	6,39 kWh	9,77 kWh

As contas de equivalências energéticas, no valor encontrado não está se considerando o rendimento do sistema de conversão do biogás em eletricidade. O resultado da conversão da energia do Biogás para Energia em kWh (energia elétrica) encontrado por LANDIN e AZEVEDO (2006) considera rendimento de um conjunto que faz a conversão da energia, um motor e gerador.

O Brasil possui imenso potencial para utilização do biogás, segundo LANDIN e AZEVEDO (2006), são explorados apenas 20MW, dos 350MW do potencial de geração de energia disponível no biogás.